



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

포화수분량을 고려한 토양수분모의 및
밭 작물 관개용수량 산정

Soil Moisture Simulation
Considering Saturated Water Flow and
Irrigation Requirement Estimation in Upland Fields

2018년 2월

서울대학교 대학원
생태조경·지역시스템공학부
지역시스템공학전공

신 용 훈

포화수분량을 고려한 토양수분모의 및
밭 작물 관개용수량 산정

Soil Moisture Simulation
Considering Saturated Water Flow and
Irrigation Requirement Estimation in Upland Fields

지도교수 최 진 용

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함

2018년 1월

서울대학교 대학원

생태조경·지역시스템공학부

지역시스템공학전공

신 용 훈

신용훈의 공학석사 학위论문을 인준함

2018년 1월

위 원 장_____ (인)

부위원장_____ (인)

위 원_____ (인)

국 문 초 록

본 연구는 물수지 방정식 기반 토양수분 모의 방식을 개선하고, 개선된 방식에 고해상도 기상자료를 적용하여 밭 작물의 관개용수량을 산정하기 위해 수행되었다. 기존 물수지 방정식 기반 토양수분 모의 방식은 포장용수량을 상한계로 하여 이를 초과하는 과잉토양수분을 즉시 배제하는 것이나, 이는 실제 토양수분 거동과 양적 및 시간적 오차를 야기한다. 따라서 본 연구에서는 토양수분 상한계를 포화수분량으로 조정하고, 지연보정계수를 적용하여 토층 간 토양수분 이동량을 제한함으로써 토양수분 모의를 개선하고자 하였다. 모의 결과를 검증하기 위해 경기도 여주시 점동면에 위치한 고추밭에서 FDR (Frequency Domain Reflectometer)를 이용하여 토양수분을 실측하였고, 제안한 모의 방식과 기존 방식에 따른 토양수분 모의 결과와 각각 비교하였다. 모형 검증 후에는 고해상도 기상자료를 적용하여 고추, 콩, 참깨를 대상으로 토양수분을 모의하고 관개용수량을 산정하였다.

연구 결과 본 연구에서 제안한 토양수분 모의 방식이 기존 모의 방식에 비해 실측 토양수분의 양적 및 시간적 변동을 정성적으로 더 잘 모사하는 것으로 나타났다. 실측치와 모의치의 R^2 에서도 제안된 토양수분 모의 방식이 기존 방식보다 더 높은 값을 나타내었고, RMSE의 경우 최하단 토층을 제외하고 제안된 방식이 가장 우수한 성능을 나타내었다. 또한 관개 모의 시 제안된 방식을 적용함에 따라 기존 방식과 관개량, 관개 횟수, 1회 관개시 관개량에 차이가 나타남을 확인하였다. LAMP자료를 적용한 토양수분의 모의 결과는 고해상도 기상자료를 적용함에 따라 기상적 지역적 편차가 반영되었고, 이에 따라 관개시점도 달라 질 수 있음을 확인하였다. LAMP 고해상도 기상모의자료를 적용한 작물별 관개용수량 산정 결과, 고추의 경우 2016년 5월 24일부터 10월 20일까지 순관개용수량은 평균 471.7 mm, 표준편차 50.7 mm로 산정되었으며, 콩의 2016년

5월 24일부터 9월 20일까지 순관개용수량은 평균 273.2 mm, 표준편차 41.7 mm, 참깨는 2016년 5월 24일부터 9월 20일까지 평균 173.8 mm, 표준편차 29.8 mm로 나타났다.

본 연구를 통해 개선된 토양수분 모의 방식은 향후 토양수분을 기반으로 하는 관개계획의 수립, 농업적 가뭄의 판단 등의 연구에 적용될 수 있을 것이다. 또한 고해상도 기상자료를 적용함으로써, 토양수분 변화 모의 및 관개량 산정에 있어 지역적 기상 편차를 반영할 수 있다는 것에 의의가 있다.

주요어 : 토양수분, 물수지방정식, 포화수분량, 관개용수량, 고해상도 기상자료
학 번 : 2016-21706

목 차

초 록.....	i
목 차.....	iii
List of Tables.....	v
List of Figures.....	vii
제 1 장 서 론.....	1
1.1 연구 배경 및 필요성.....	1
1.2 연구 목적.....	3
제 2 장 연구사.....	4
2.1 토양수분의 모의와 응용.....	4
2.2 고해상도 기상자료의 개발과 응용.....	7
제 3 장 재료 및 방법.....	9
3.1 물수지 방정식 기반 토양수분 모의.....	9
3.1.1 물수지방정식.....	9
3.1.2 토양수분 소비형.....	9
3.1.3 자연보정계수.....	11
3.1.4 유효우량 및 작물증발산량.....	12
3.2 토양수분 기반 관개용수량 산정.....	15
3.3 토양수분 모의 비교 및 검증.....	17
3.3.1 토양수분 현장 측정.....	17
3.3.2 토양수분 모의 결과 비교.....	17
3.3.3 관개용수량 산정 결과 비교.....	19

3.4 입력자료	20
3.4.1 고해상도 기상자료	20
3.4.2 모의대상지역 및 모의기간	24
3.4.3 토지이용자료 및 작물별 작물계수	24
3.4.4 토성분포자료 및 토성별 특성자료	27
 제 4 장 결과 및 고찰	 30
4.1 토양수분 모의 비교 및 검증 결과	30
4.2 고해상도 기상모의자료 적용 토양수분 모의 결과	49
4.3 고해상도 기상모의자료 적용 관개용수량 산정 결과	60
 제 5 장 요약 및 결론	 67
 References	 70
Abstract	77

List of Tables

Table 3.1	Parameter settings for soil moisture simulation	18
Table 3.2	Conversion formulas for daily weather data from LAMP variables	23
Table 3.3	Land use types by code	24
Table 3.4	Crop coefficients for red pepper	26
Table 3.5	Crop coefficients for bean	26
Table 3.6	Crop coefficients for sesame	26
Table 3.7	Areal soil texture distribution of the study area	27
Table 3.8	Soil texture characteristics	29
Table 4.1	Soil moisture contents by soil depth.....	31
Table 4.2	Observed soil moisture variation by soil depth (‘16. 7.15 ~ 7.17.)	43
Table 4.3	Simulated soil moisture variation by soil layer (‘16. 7.15 ~ 7.17.)	43
Table 4.4	Validation results for soil moisture simulations	45
Table 4.5	Simulated net irrigation requirements (‘16. 6. 4. ~ 10.20.)	47
Table 4.6	Variation of estimated soil moisture contents for red pepper (‘16. 9.15.)	57
Table 4.7	Variation of estimated soil moisture contents for bean (‘16. 9.15.)	58
Table 4.8	Variation of estimated soil moisture contents for sesame (‘16. 9.15.)	59

Table 4.9	Variation of net irrigation requirements for red pepper about soil texture	62
Table 4.10	Variation of net irrigation requirements for bean about soil texture	64
Table 4.11	Variation of net irrigation requirements for sesame about soil texture	66

List of Figures

Fig. 3.1	Water balance in effective soil layer.....	10
Fig. 3.2	Daily weather data (daily average temperature) map extracted from LAMP coverage with administrative districts.....	21
Fig. 3.3	Land use map of the study area.....	25
Fig. 3.4	Soil texture map of the study area.....	28
Fig. 4.1	Comparison of soil moisture contents between simulated results and observed data (Type I)	36
Fig. 4.2	Comparison of soil moisture contents between simulated results and observed data (Type II)	38
Fig. 4.3	Comparison of soil moisture contents between simulated results and observed data (Type III) ...	40
Fig. 4.4	Soil moisture contents in irrigated condition (Type I, layer 1)	46
Fig. 4.5	Soil moisture contents in irrigated condition (Type II, layer 1)	46
Fig. 4.6	Soil moisture contents in irrigated condition (Type III, layer 1)	47
Fig. 4.7	Spatially detailed soil moisture contents of the study area (red pepper)	50
Fig. 4.8	Spatially detailed soil moisture contents of the study area (bean)	52
Fig. 4.9	Spatially detailed soil moisture contents of the study area (sesame)	54

Fig. 4.10	Spatial variation of net irrigation requirements for red pepper according to spatially different weather conditions	61
Fig. 4.11	Variation of net irrigation requirements for red pepper about soil texture of the study area	62
Fig. 4.12	Spatial variation of net irrigation requirements for bean according to spatially different weather conditions	63
Fig. 4.13	Variation of net irrigation requirements for bean about soil texture of the study area	64
Fig. 4.14	Spatial variation of net irrigation requirements for sesame according to spatially different weather conditions	65
Fig. 4.15	Variation of net irrigation requirements for sesame about soil texture of the study area	66

제 1 장 서 론

1.1 연구 배경 및 필요성

토양수분은 강우, 침투, 유출 및 증발산 순환의 연결고리로서, 작물 생육에 영향을 주는 주요한 인자이다 (김옥경 외, 2006; Nam et al., 2011; 홍은미 외, 2015). 밭은 지표면 담수를 허용하지 않으므로 작물 근근역의 토양수분은 기상과 작물에 따라 증감하며, 토양의 수리 특성에 따라 재분포된다 (노희명, 1988). 토양수분이 부족하면 작물의 광합성 등 생리작용이 부진하고, 토양수분이 과도하면 토양산소가 부족하여 호흡장애가 발생하여 작물의 무기성분 흡수가 저해된다 (정하우 외, 2013). 따라서 밭 작물의 생산성 증대를 위해선 토양수분에 기초한 작물 생육환경의 관리가 필요하다.

토양수분은 일차적으로 강우에 의해 공급될 수 있으나, 강우의 발생 주기와 강우량은 일정하지 않은 문제점이 있다. 따라서 상시 최적 작물 생육환경을 유지하기 위해선 적절한 시기와 양의 관개에 의한 수분 공급이 이루어져야 한다. 더욱이 우리나라는 강우의 연중편차가 커서 관개를 통한 용수공급이 필수적이다. 이때, 관개의 시기와 용수량을 결정하기 위해선 근근역에서 토양수분량을 파악하고, 변화를 예측 할 수 있어야 한다.

토양수분은 작물과 토성에 영향을 받으며, 따라서 특정 지점의 측정값을 대푯값으로 사용하기 어렵다. 토양수분의 실측자료는 현재 기상청 농업기상관측자료와 농촌진흥청 농업기상정보서비스를 통해 제공되고 있으나 작물 및 토성별 세분화 되어 있지 않으며, 관개용수량 산정 대상지마다 직접 토양수분 실측을 수행하는 방안은 현실적으로 적용하기 어렵다. 토양수분 모의는 이에 대한 대안이 될 수 있으며, 물수지 방정식에 기반한 토양수분 모의 및 관개용수량 산정이 정립되어 사용되어 왔다 (Jensen et al., 1971; 김희철과 고재균, 1977 a, b).

물수지 방정식은 유효토층과 외부와의 수분 유·출입을 표현하는 식으로, 물수지 방정식에 의한 토양수분 모의 및 관개용수량 산정은 포장용수

량에 기초하여 이루어져 왔다. 포장용수량을 초과하는 용수 공급은 중력수가 되어 배수되므로, 관개용수량 산정을 위한 토양수분 모의에서는 포장용수량을 모의치의 상한계로 하고, 그 이상의 토양수분은 즉시 배수되는 것으로 가정하였다 (이광야와 김선주, 2001; 서영제와 이광야, 2002; 서명철 외, 2012; 남원호 외, 2014; 홍민기 외, 2015). 이러한 토양수분 모의 방식은 단순하여 토양수분을 기반으로 한 연구에 범용적으로 적용하기 용이하다는 장점이 있으나, 충분한 강우에 의해 토양수분이 포장용수량 이상으로 상승하는 현상을 반영하지 못하고, 포장용수량을 초과하는 토양수분을 즉시 배제하여 실제 토양수분 거동과 양적 및 시간적 차이를 야기할 수 있다. 불포화토양에서의 수분거동을 모의하는 Richard 방정식을 적용할 경우, 토양의 수리적 특성계수와 식물뿌리의 수분흡수 등 고려해야 할 변수가 많아지며, 모형을 범용적으로 사용하기 어려워진다. 따라서 물수지 방정식의 단순성을 유지하되, 기존 모의 방식의 문제점들을 개선할 수 있는 방안이 필요하다.

한편 기상모델이 발전함에 따라 농림 분야를 위한 기상모델들이 개발되고 있으며, 이를 통해 고해상도 기상예측자료의 생산이 가능해졌다 (이승재 외, 2016). 기상자료의 해상도가 높아지면 지역별 토성과 밭 분포를 반영하기 유리하며, 티센망이 적용된 기상관측소 자료를 이용하는 경우에 비해 지역별 편차를 반영한 토양수분 모의가 가능하여 필요수량 산정의 정확성이 향상될 수 있다 (홍민기 외, 2015). 현재 우리나라는 기상청에서 2005년부터 5 km 해상도로 '동네예보'라는 기상예측자료를 생산하고 있으며, 국가농림기상센터에서도 최근 810 m 해상도로 NCAM-LAMP라는 기상예측자료를 생산하고 있다. 이러한 고해상도 기상자료를 토양수분 모의에 적용할 경우 해상도 향상에 따른 편익과 함께, 향후 기상예측자료와 연계하여 기상 상황에 맞춘 실시간 용수계획 수립도 가능할 것으로 기대된다.

1.2 연구 목적

본 연구의 목적은 물수지 방정식을 이용한 토양수분 모의 시 포장용수량에 기반한 기존 모의 방식을 개선하고, 개선된 방식에 고해상도 기상자료를 적용하여 밭작물의 관개용수량 산정을 수행하는 것이다. 기존 토양수분 모의 방식은 포장용수량을 토양수분 모의의 상한계로 설정하여, 토양수분의 양적, 시간적 편차가 발생 할 수 있으므로, 이를 개선하기 위해 포화수분량을 이용한 토양수분 모의 방식을 제안하고자 한다. 제안된 방식에 따라 얻어진 토양수분 모의 결과는, 실측 토양수분 자료 및 기존 방식을 통한 모의 자료와 비교를 통해 모의 성능을 검증하고자 한다. 검증을 수행한 뒤에는 고해상도 기상자료인 NCAM-LAMP 기상모의자료를 활용하여 고추, 콩, 참깨에 대해 토양수분 모의를 수행하고 분석하고자 한다. 이후 토양수분 모의 결과를 바탕으로 관개 모의를 수행하고 관개용수량을 산정하며, 이를 통해 고해상도 기상자료 적용에 따른 모의 결과의 특성을 분석하고자 한다.

제 2 장 연구사

2.1 토양수분의 모의와 응용

초기 토양수분 모의는 흙 속의 포화되지 않은 수분의 거동 모사에 대해 다루었다. Briggs (1897)는 토양입자 간 수분에 작용하는 물리력에 따른 토양수분의 이동을 제시하였으며, Buckingham (1907)은 토양 내 수분 이동에 포텐셜 개념을 도입하고, 토성 및 현재 수분량에 따른수리전도도의 변화를 제시하고자 하였다. Gardner (1919)는 불포화토양 내 토양수분 거동에 확산 방정식 형태의 편미분방정식을 적용하였다. Richards (1931)는 불포화 다공성 매질에서의 액체 거동을 연속방정식과 Darcy의 법칙을 전개하여 편미분방정식 형태의 불포화 토양 내 수분 이동을 규명하였고, 수분 함량에 따른 불포화 수리전도도를 실험적으로 제시하였다. Richard 방정식은 해석적 풀이가 불가능한 비선형 편미분방정식이므로, Klute (1952)는 수분 확산도 함수 (water diffusivity function)을 적용하여 불포화 등은 수분 이동을 해석하였고, Hanks and Bowers (1962)는 유한차분법을 적용하여 불포화 토양 수분 이동의 수치해석을 수행하였다.

이후 연구에서는 토양수분 모의에 외부요소인 작물을 고려하게 되었고, 포장 내 물수지 개념이 도입되었다. Cowan (1965)은 토양-작물-대기 계 내에서의 수분 이동에 관한 연구를 통해 수분 이동에 작물의 영향을 고려하였으며, Philip (1966)은 토양-작물-대기 계에서의 수분이동에 대한 연속성 개념 (Soil-Plant-Atmospheric Continuum, SPAC)으로 체계화 하였다. Molz and Remson (1971)은 Molz (1971)가 제시한 작물의 토양수분 흡수모형을 이용하여 작물의 증산에 의한 수분이동에 관한 1차원적 모형을 개발하였다. Jensen et al. (1971)은 증발산량, 강우량, 관개량, 지하배수량으로 구성된 토양수분 부족분의 물수지 방정식을 기반으로, 알팔파를 대상으로 토양수분 모의 및 관개모의를 수행하였다. 이는 김철희와 고재균 (1977 a, b)에 의해 우리나라에 적용되어 식양토, 사양

토, 양질 사토에서의 토양수분 미흡량 및 토양수분 감수량 산정에 이용되었다. Nimah and Hanks (1973 a, b)는 물수지에 관여하는 인자들에 실험을 통해 고찰하였다.

이후 토양수분 모의는 여러 연구 목적에 맞추어 지속 수행되었는데, Belmans et al. (1983)은 작물과 기상요소 및 지하수를 고려한 수치해석 기반 1차원 토양수분 이동 모형인 SWATRE를 개발하였으며, Feyen et al. (1986)은 기존 모형을 개선한 SWATRER 모형을 제시하였다. 최진용 (1991)은 SWATRER를 우리나라에 적용하여 토양수분 모의 성능을 평가하고, 이를 이용하여 발작물의 관개계획을 수립하는 연구를 진행하였다. Alley (1984)는 미국 뉴저지 지역을 대상으로 월별 증발산량, 토양수분 함량, 지하수 함량을 분석하고, 실측치를 통해 검토하는 연구를 하였다. Ledieu et al. (1986)은 토양수분 실측에 TDR (Time domain reflectometry) 방식을 적용하고 소개하였다. Huang et al. (1995)는 미국 전역에 대하여 물수지 방정식에 기반하여 60여년간 월별 토양수분 변화를 모의하고, 월별 토양수분의 평년자료를 구축하였고, Vorosmarty et al. (1998)은 미국 전역에 대하여 토양 물수지를 실시하고, 잠재증발산량을 모의하는 연구를 진행하였다. Yamaguchi and Shinoda (2002)은 물수지 방정식에 기반하여 나이지리아에서의 토양수분 모의를 비교하였고, 이를 실측자료를 통해 검증하였다. Aubert et al. (2003)은 홍수 예측을 위해 토양수분 모형을 이용하여 토양수분을 모의하고, TDR을 통해 실측된 자료와 동화하여 토양수분을 결정하고 지역 유출량 모의 및 홍수 예측을 수행하였다.

국내에서는 토양수분 모형을 우리나라에 맞게 적용시키기 위한 연구들이 진행되었는데, 유능환과 민병섭 (1974)는 밭에서의 증발산량을 산정하기 위한 토양수분의 소비과정에 관한 연구를 진행하였다. 노희명 (1988)은 나지를 대상으로 유한차분법을 이용하여 토양에서의 수분의 이동 및 분포 추정하였다. 정하우 (1990)은 토양수분 모형을 기반으로 토양수분을 모의하고, 관개량을 산정하는 방법론을 정립하였다.

이후 토양수분 모의는 이를 기반으로 하는 국내 다른 응용연구에 적용되었으며, 주로 포장용수량에 기반한 물수지 방정식의 풀이가 사용되었다. 최진용 (1996)은 소유역을 격자로 분할하고 일 유출량 산정을 산정하는 장기유출 모형 CELTHYM를 개발하였는데, 격자별 토양수분을 결정하기 위해 이와 같은 방식을 적용하였다. 배승중 (1998)은 동일한 방식에 따라 토양수분 물수지를 수행하여 토양수분 변화를 모의하고, 이를 기반으로 농업적 가뭄을 분석하는 연구를 진행하였다. 이광야와 김선주 (2001), 서영제와 이광야 (2002)는 발용수량 산정에 있어 위 모의 방식을 적용하였다. 김옥경 외 (2006)는 유역별 토양수분 모의를 진행하고, 이를 기반으로 토양수분 가뭄지수 SMI를 제시하여 유역단위 가뭄 평가를 수행하였다. 서명철 외 (2012)는 일별 기상자료와 토양 물수지 풀이를 이용하여 토양수분을 예측하는 모형인 AFKAE0.5를 개발하고, 이를 공주지역 고추포장에 적용하였다. 남원호 외 (2014)는 미래기후변화 시나리오인 RCP 4.5와 8.5에 따른 기상자료를 적용하여 토양수분을 모의하고 미래 주요 발작물 소비수량과 관개용수량을 산정하였으며, 홍은미 외 (2015)는 동일한 기상자료를 이용하여 주요 발작물의 토양수분 기반 가뭄지수를 산정하였다.

2.2 고해상도 기상자료의 개발과 응용

기상 모형에 의한 기상 모의 및 예측자료의 생산은 컴퓨터의 발명과 연산능력의 증가에 따라 지속 발전해오고 있다. 수치해석을 기반으로 한 최초의 수치예보는 1920년대부터 시도되었으나 손으로 계산하는 방식에 한계로 실패하였다. 1950년대에 들어서 컴퓨터의 발명에 따른 수치해석의 발전하였고, Charney et al. (1950)에 의해 단순화된 대기현상의 지배방정식이 제안된 이후, 여러 연구소들과 미 공군, 해군, 기상청 등에서 지속적으로 연구되어 오늘날에 이르고 있다. 이러한 컴퓨터를 이용한 기상예측의 세계사는 이승재 외 (2012)에 상세하게 기술되어 있다.

우리나라는 1980년대에 수치예보법을 처음 도입하였다. 1983년부터는 한국형 수치예보시스템을 개발하였고, 이후 2005년에는 기상청에서 5 Km 해상도 수치예보인 '동네예보' 기상예측자료를 생산하게 되었다 (김수옥 외, 2013; 이하늘, 2017). 홍기옥 외 (2007)는 GIS 기반 지리정보를 통해 기상모델인 PRISM을 한반도에 적용하여 남한 전역의 격자형 기온자료를 추출하는 연구를 진행하였다. 김맹기 외 (2013)는 PRISM을 한국에 맞추어 개선한 MK-PRISM을 이용하여 일 최대기온, 일 최소기온, 일 평균기온 및 일 강우량을 1 km의 해상도로 산정하였다.

이승재 외 (2014)는 90 m SRTM 지형자료와 지면모델인 Noah를 적용한 WRF 기상모형을 이용하여 온도와 풍속에 대한 고해상도 기상자료를 생산하였다. 이후 송지애 외 (2015)는 Niu et al. (2011)이 제시한 지면모델인 Noah-MP를 적용하고, 해상도를 6개 도메인으로 세분화한 WRF/Noah-MP 기상모형을 구축하여, 청미천 유역의 기상을 모의하였다. 이승재 외 (2016)는 WRF/Noah-MP 기상모형을 바탕으로 7일간 기상예측을 진행하는 국가농림기상센터 지면대기모델링패키지 NCAM-LAMP 버전 1을 생산하였으며, 현재는 12일로 예측기간이 증가되었다.

기상모델이 발전함에 따라 고해상도의 자료 생산이 가능해지고, 이러한 자료들이 농업 수리분야에 점차 적용되고 있다. Abatzoglou (2011)는 PRISM 모델의 4 km 고해상도 기상자료를 바탕으로 1979년부터 2010

년까지 미국을 대상으로 생태모델링을 수행하였으며, Greve et al. (2013)은 WRF-Noah 기상모델을 이용한 고해상도 기상모의자료를 이용하여 프랑스 남부 지역의 토양수분 모의를 진행하였다. 국내에서는 백종진 외 (2012)가 WRF-ARW 기후모델을 이용하여 청미천의 유출모의를 통해 유출곡선을 구하는 연구를 진행하였다. 김수옥 외 (2013), 김대준과 윤진일 (2013), 김수옥과 윤진일 (2014, 2015, 2016)은 동네예보자료를 영농분야에 적용하기 위하여 기온, 강수량, 일사량 등 기상요소에 대하여 보완하는 연구를 진행하였다. 홍민기 외 (2015)는 WRF 기상자료를 활용하여 복숭아밭을 대상으로 토양물수지를 수행하였으며, 신용훈 외 (2017)는 WRF 기반 NCAM-LAMP 기상자료를 활용하여 고추의 생육기간 중 관개모의를 하였다.

제 3 장 재 료 및 방 법

3.1 물수지 방정식 기반 토양수분 모의

3.1.1 물수지 방정식

토양수분의 모의는 물수지 방정식을 기반으로 하였다. 물수지 방정식은 유효토층 내 수분의 유출입 인자 간의 수지를 표현한 식으로 기본적인 형태는 다음 식 (3.1)과 같다.

$$\Delta S = (P + IR + CR + HI) - (RO + ET + DP + HO) \quad (3.1)$$

ΔS 는 토양수분 변화량 (mm), P 는 강수량 (mm), IR 은 관개량 (mm), CR 은 모관력에 의한 수분상승량 (mm), HI 는 횡방향 수분유입량 (mm), RO 는 지표유출량 (mm), ET 는 작물증발산량 (mm), DP 는 유효토층 하부에서의 지하배수량 (mm), HO 는 횡방향 수분유출량 (mm)이다. 물수지 방정식에서 모관력에 의한 수분상승량은 상대적으로 적은 양이므로 제외할 수 있으며, 횡방향 유출입을 상호 상쇄되는 값으로 가정하면, 관개량이 없을 때 물수지 방정식은 다음 식 (3.2)와 같다.

$$\Delta S = (P - RO) - ET - DP \quad (3.2)$$

3.1.2 토양수분 소비형

토양수분 소비형 (Soil Moisture Extraction Pattern, SMEP)은 유효토층을 몇 개의 층으로 분할하였을 때, 유효토층 전체의 수분 감소율에 대한 각 층의 수분 감소량의 비율이다. 토양수분 소비형은 작물의 종류, 생육 시기, 수분 상태에 따라 다르고 일반적으로 표층에서 하부토층에 비해 상대적으로 큰 값을 가진다 (정하우 외, 2013).

토양수분 소비형을 고려하기 위해 본 연구에서는 4개의 토층을 가정하

고 각 토층의 두께를 20 cm로 하여 토층 1 (0 cm ~ 20 cm), 토층 2 (20 cm ~ 40 cm), 토층 3 (40 cm ~ 60 cm), 토층 4 (60 cm ~ 80 cm)을 구성하였다. 나뉜 네 토층에 대하여 식 (3.2)의 물수지 방정식을 각각 적용하면 다음 식 (3.3) ~ (3.6)과 같으며, 이를 도식화하면 Fig. 3.1과 같다.

$$\Delta S_1 = (P - RO) - ET_1 - DP_1 \quad (3.3)$$

$$\Delta S_2 = (DP_1) - ET_2 - DP_2 \quad (3.4)$$

$$\Delta S_3 = (DP_2) - ET_3 - DP_3 \quad (3.5)$$

$$\Delta S_4 = (DP_3) - ET_4 - DP \quad (3.6)$$

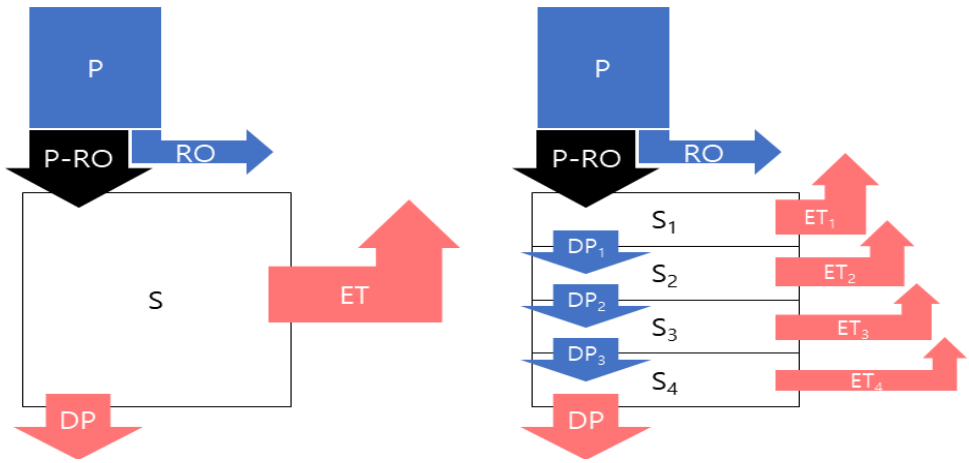


Fig. 3.1 Water balance in effective soil layer.

ΔS_i 는 i 번째 토층에서의 토양수분 변화량 (mm)이며, ET_i 는 토양수분 소비형에 따른 i 번째 토층에서의 작물증발산량 (mm)으로 $ET = \sum_{i=1}^4 (ET_i)$ 가 성립한다. DP_i 는 i 번째 토층에서 $i+1$ 번째 토층으로의 수분 이동량 (mm)이며, 상위 토층의 토양수분이 포장상태를 초과한 경우 하부 토층으로 이동하게 된다.

3.1.3 자연보정계수

토양수분 모의를 위한 물수지 방정식의 기존 풀이 방식에서는 포장용수량을 유효토층 내 토양수분 혹은 토층별 토양수분의 상한계로 하여, 초과량이 즉시 배수 혹은 하부로 이동되도록 모의하였다. 이러한 모의 방식은 포장용수량 이상의 토양수분이 배수되기까지의 시간을 고려하지 않아, 토양수분이 포장용수량 이하로만 모의되는 한계가 존재하였다. 포장용수량에 대하여 정하우 외 (2013)는 포장에 충분한 물을 공급한 후 24시간 정도 경과하여 중력수가 유하하고 난 뒤의 토양 함수량으로 소개하고 있으며, Shaxson and Barber (2003)는 잘 구조화된 토양 (well-structured soil)에서 포화로부터 48시간 배수된 후 도달하는 함수량으로 보고하였고, 만일 구조화되지 않은 경우 그 이상의 시간이 경과해야 포장용수량에 다르다고 하였다. 홍은미 외 (2012)는 잣나무림의 토양수분을 관측한 결과 포장용수량을 초과하는 토양수분의 배수는 4월 ~ 6월 및 9월 ~ 10월에서 2일, 7월 ~ 8월에서 1일이 소요되는 것으로 보고하였다. 이러한 연구 결과들은 충분한 강우량이 발생한 경우에는 토양수분이 포장용수량 이상으로 유지 될 수 있음을 의미하며, 이로 인하여 토양수분 모의와 관개용수량 산정에 양적 시간적 편차가 발생할 수 있다.

본 연구에서는 물수지 방정식의 기존 풀이 방식의 이러한 문제점들을 해소하기 위하여, 토양수분 모의의 상한계를 포장용수량에서 포화용수량으로 변경하였다. 또한 포장용수량을 초과하는 토양수분 과잉량이 배제되는 시간을 간접적으로 반영하기 위해 자연보정계수 α 를 '상부 토층의 토양수분 과잉량 중 하부토층으로 이동하는 1일 토양수분 이동량의 비'로 정의하여 사용하였다. 포장용수량을 초과하는 토양수분은 유하해야 하므로 α 는 0보다 큰 값을 가지며, 정의에 따라 1이하의 값을 가진다. 물수지 방정식의 기존 풀이 방식은 α 가 1인 경우라 할 수 있다.

따라서 i 번째 토층에서의 포장용수량에 도달하기까지 토양수분 미흡량을 Dr_i 이라 할 때, 토층 1에서 2번째 토층으로 이동량은 식 (3.7)과 같으며, 나머지 토층의 경우 식 (3.8)과 같다 (신용훈 외, 2017).

$$DP_1 = \begin{cases} \alpha \times ((P - RO) - Dr_1) & ((P - RO) - Dr_1 > 0) \\ 0 & ((P - RO) - Dr_1 \leq 0) \end{cases} \quad (3.7)$$

$$DP_i = \begin{cases} \alpha \times (DP_{i-1} - Dr_i) & (DP_{i-1} - Dr_i > 0) \\ 0 & (DP_{i-1} - Dr_i \leq 0) \end{cases} \quad (3.8)$$

위 식 (3.7)과 (3.8)에 따라 하부토층으로 이동하지 못한 토양수분은 해당 토층에 잔류하되, 포화수분량을 초과하는 경우는 즉시 하부로 배수 되도록 하였다. α 의 값은 토층별 토양수분 함량, 토층간 토양수분 차, 토성 등에 따라 달라 질 수 있을 것이나, 본 연구에서는 하나의 값으로 가정하였고, 토양수분 실측결과를 이용하여 시행착오법으로 보정하여 결정하였다.

3.1.4 유효우량 및 작물증발산량

유효우량은 포장에서 필요한 수량 중 강우를 통해 직접 공급되고 이용되는 양을 말하며, 본 연구에서는 강우량에서 지표유출량을 뺀 값을 유효우량으로 표기하였다. 유효우량은 관개량이 없을 경우 토양수분모형의 유입인자가 되며, 식 (3.2)의 $P - RO$ 에 해당한다. 지표유출량은 미국자연자원보호청 (Natural Resources Conservation Service, NRCS)의 CN (Curve Number)방법을 적용하여 다음 식 (3.9) ~ (3.10)에 따라 산정하였다.

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \quad (P \geq 0.2S) \quad (3.9)$$

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (3.10)$$

Q 는 지표유출량 (mm)이며, P 는 강우량 (mm), S 는 최대잠재보유수량 (mm)을 의미한다. CN 은 유출곡선지수로 선행토양함수조건 (Antecedent

soil Moisture Condition, AMC)에 따라 산정하였다(USSCS, 1973).

작물증발산량 (Crop evapotranspiration)은 FAO Penman-Monteith 식에 따라 잠재증발산량을 구하고, 작물계수를 곱하여 구하는 방식이 권고되고 있다 (Allen et al., 2006). 잠재증발산량의 산정 방식은 다음 식 (3.11)과 같다.

$$ET_0 = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1+0.34u_2)} \quad (3.11)$$

ET_0 는 잠재증발산량 (mm/day), Δ 은 증기압 곡선의 기울기 ($kPa/^\circ C$), R_n 은 순일사량 ($MJ/m^2 day$), G 는 토양의 열 유속 ($MJ/m^2 day$), γ 는 건습 계 상수 ($kPa/^\circ C$), T 는 평균기온($^\circ C$), u_2 는 2 m 높이에서의 풍속 (m/s), e_s 는 포화증기압 (kPa), e_a 는 실제증기압 (kPa)이다. 작물증발산량의 산정은 다음 식 (3.12)와 같다.

$$ET = ET_0 \times K_c \times K_s \quad (3.12)$$

K_c 는 작물계수이며, K_s 는 토양수분 스트레스지수로 토양 내 수분량이 적어질 경우 작물의 증산 저감에 따른 작물계수의 보정치이다. 토양수분 스트레스지수는 전유효수분량 (Total Available soil Water, TAW)과 용이토양수분량 (Readily Available soil Water, RAW)을 통해 산정되며, 그 과정은 식 (3.13) ~ (3.15)와 같다 (Allen et al., 2006).

$$TAW = (\theta_{FC} - \theta_{WP}) \times Z_r \quad (3.13)$$

$$RAW = \bar{P} \times TAW \quad (3.14)$$

$$K_s = \frac{TAW - D_r}{TAW - RAW} \quad (3.15)$$

θ_{FC} 과 θ_{WP} 는 각각 포장용수량과 영구위조점 (m^3/m^3), Z_r 은 작물 뿌리의 깊이 (mm)이며, Z_r 은 토층의 두께로 200 mm를 적용하였다. \bar{P} 는 전 유효수분량 중 토양수분스트레스가 발생하기 직전 수분량의 비율로 작물에 따라 달라지며, 통상적인 값인 0.50을 적용하였다 (Allen et al., 2006). K_s 는 토양수분 분포형에 따라 토층별로 잠재증발산량을 분배 한 후 계산하였으며, 이를 통해 토층별 작물증발산량 (ET_i)을 산정하였다.

3.2 토양수분 기반 관개용수량 산정

관개용수량은 관개 시점을 판단하고 해당 시점의 토양수분 미흡량을 기준으로 산정되었다. 관개 시점은 일별 토양수분 모의 결과로 하나 이상의 토층 내 토양수분이 용이토양수분 이하가 되어 수분스트레스가 발생할 경우이며, 이는 작물의 최적생육조건 확보와 효율적인 물사용을 위한 것이다. 관개 시점 판단을 위한 일별 토양수분 모의는 식 (3.16) ~ (3.19)와 같이 계산할 수 있으며, 이는 식 (3.3) ~ (3.6)을 일별 모의형태로 바꾼 것이다.

$$S_{1,t}^* = S_{1,t-1} + \Delta S_{1,t}^* = S_{1,t-1} + (P_t - RO_t - ET_{1,t} - DP_{1,t}) \quad (3.16)$$

$$S_{2,t}^* = S_{2,t-1} + \Delta S_{2,t}^* = S_{2,t-1} + (DP_{1,t} - ET_{2,t} - DP_{2,t}) \quad (3.17)$$

$$S_{3,t}^* = S_{3,t-1} + \Delta S_{3,t}^* = S_{3,t-1} + (DP_{2,t} - ET_{3,t} - DP_{3,t}) \quad (3.18)$$

$$S_{4,t}^* = S_{4,t-1} + \Delta S_{4,t}^* = S_{4,t-1} + (DP_{3,t} - ET_{4,t} - DP_{4,t}) \quad (3.19)$$

$S_{i,t}^*$, $\Delta S_{i,t}^*$ 는 각각 t일에서 관개가 시행되지 않았을 때 i번째 토층에서의 토양수분량 (mm), 토양수분 변화량 (mm)을 나타내며, $S_{i,t-1}$ 은 t-1일에서의 관개 여부 판단 이후 결정된 i번째 토양수분량 (mm)이다. 관개 시점은 다음 식 (3.20) ~ (3.23)에 따라서 계산된 토층별 토양수분 미흡량을 통해 결정된다.

$$D_{1,t}^* = TAW_1 - S_{1,t}^* \quad (3.20)$$

$$D_{2,t}^* = TAW_2 - S_{2,t}^* \quad (3.21)$$

$$D_{3,t}^* = TAW_3 - S_{3,t}^* \quad (3.22)$$

$$D_{4,t}^* = TAW_4 - S_{4,t}^* \quad (3.23)$$

$D_{i,t}^*$ 는 t일에서 관개가 시행되지 않았을 때 i번째 토층에서의 토양수분 미흡량 (mm)을 나타낸다. 계산된 토층별 토양수분 미흡량 ($D_{i,t}^*$) 중 하나 이상이 해당 토층의 용이토양수분량 (RAW_i)을 초과하는 경우, 수분스트레스가 발생하므로 관개를 수행해야 한다.

관개용수량은 관개가 필요한 경우 그 날의 토양수분 변동량을 포함하여 전 토층이 포장용수량에 다다르기 위한 양으로 하였다. 따라서 1회 관개 시 순 관개용수량은 다음 식 (3.24)와 같다.

$$IR_t = \sum_{i=1}^4 (D_{i,t}^*) - (P_t - RO_t) + ET_t \quad (3.24)$$

IR_t 은 t일에서 순관개량 (mm)이다. 관개에 의한 토양수분 상승은 강우와 달리 상대적으로 적은 수량이 긴 시간동안 공급되므로, 자연보정계수 α 를 적용하지 않았다. 이에 따라 1회 관개 이후 전 토층의 토양수분 ($S_{i,t}$)은 포장용수량으로 결정된다. 관개가 이루어지지 않은 경우에는 앞서 계산된 $S_{i,t}^*$ 의 값이 각 토층의 토양수분량 ($S_{i,t}$)으로 결정된다.

3.3 토양수분 모의 비교 및 검증

3.3.1 토양수분 현장 측정

토양수분 모의 결과의 검증은 FDR (Frequency Duration Reflectometer)을 이용하여 수집된 토양수분 실측자료와 비교를 통해 수행되었다. FDR은 Apcos 社의 EnviroPro를 사용하였다. 해당 장비는 부피단위 토양수분 (Volumetric Water content)를 % 단위로 제공하며, 토양수분의 측정 범위는 0 % ~ 50 %이고, 오차는 ± 2 %이다.

대상지역은 경기도 여주시 점동면 성신리에 위치한 고추밭으로 위도 37.17°, 경도 127.67°에 해당하며, 2016년 4월 29일에 고추가 이식되었고, 10월 25일에 수확이 이루어졌다. 밭을 관리하는 농민과 면담 결과에서 토성은 마사토 (굵은모래)로 확인하였으며, 실제 토양을 채취하여 미농무성 삼각분류법에 따라 분류한 결과 양질사토 (Loamy sand)로 나타났다. 관개의 경우 평상시엔 시행되지 않았으나, 이식 직후와 가뭄이 발생한 8월 중 관개가 수행되었음이 확인되었다.

토양수분 실측은 2016년 6월 4일부터 시행되었으며, 모니터링 지점은 표층으로부터 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 cm 이며, 실측 주기는 1시간이다. 측정된 자료를 바탕으로 10, 30, 50, 70 cm 지점의 일별 토양수분 실측자료를 구축하였다.

3.3.2 토양수분 모의 결과 비교

지연보정계수를 고려한 토양수분 모의 방식을 검증하고, 기존 방식과 비교하기 위하여 토양수분 현장 측정지의 지배관측소인 이천관측소의 기상자료를 기반으로 토양수분 모의를 진행하였다. 모의 기간은 실측자료 기간을 고려하여 2016년 6월 4일부터 10월 20일까지 수행되었으며, 후술할 고추의 순별 작물계수를 적용하였다. 각 토층별 토양수분 초기치는 실측값과 동일하게 설정하여 모의되었다.

모의 방식은 총 3가지로, 보정계수를 고려한 모의 방식 (Type I)과 보정계수를 고려하지 않는 기존 모의 방식에 Type I과 동일한 매개변수를

적용한 경우 (Type II), 보정계수를 고려하지 않는 기존 모의 방식에 매개변수를 달리한 경우 (Type III)이다. Type II는 동일 매개변수에 대하여 모의방식의 변경 효과를 보기 위해 설계되었으며, Type III는 기존 방식을 고수한 채 매개변수 조정을 통해 토양수분 모의 성능을 향상시키고자 할 때 나타날 수 있는 문제점을 확인하고자 하였다.

매개변수에는 토양수분 모의 시 보정에 이용되는 포장용수량, 영구위조점, 토양수분 소비형이 있으며, Type I의 경우 자연보정계수와 포화수분량이 추가된다. **Table 3.1**은 Type I, II, III에 적용된 매개변수값을 정리한 것이다.

Table 3.1 Parameter settings for soil moisture simulation

Type	Layer	θ_{FC}	θ_{WP}	TAW	SMEP	α	θ_{SAT}
I	Layer 1	0.23	0.16	0.07	0.59	0.36	0.45
	Layer 2	0.27	0.20	0.07	0.23	0.36	0.45
	Layer 3	0.31	0.24	0.07	0.17	0.36	0.45
	Layer 4	0.10	0.03	0.07	0.01	0.36	0.45
II	Layer 1	0.23	0.16	0.07	0.59	—	—
	Layer 2	0.27	0.20	0.07	0.23	—	—
	Layer 3	0.31	0.24	0.07	0.17	—	—
	Layer 4	0.10	0.03	0.07	0.01	—	—
III	Layer 1	0.27	0.16	0.11	0.59	—	—
	Layer 2	0.31	0.20	0.11	0.23	—	—
	Layer 3	0.35	0.24	0.11	0.17	—	—
	Layer 4	0.11	0.03	0.08	0.01	—	—

θ_{FC} : Field capacity (m^3/m^3), θ_{WP} : Wilting point (m^3/m^3),

TAW: Total available water (m^3/m^3), SMEP: Soil moisture extraction pattern,

α : Lag coefficient, θ_{SAT} : Saturated water (m^3/m^3)

매개변수는 토양수분 실측 결과를 토대로 선택되었으며, 모의 방식에 따른 모의 성능의 정량적 비교를 위해 결정계수 R^2 와 평균제곱근오차 (Root mean square error, RMSE)를 산정하였다.

3.3.3 관개용수량 산정 결과 비교

토양수분 모의와 동일하게 세 모의 방식 (Type I, II, III)에 대하여 3.2에서 서술한 관개용수량 산정 방식에 따라 2016년 6월 4일부터 10월 20일까지 기간에 대하여 관개용수량 산정을 진행하였다. 모의 방식에 따른 결과의 차이를 비교하기 위해 기간 중 모의된 총 순관개용수량과 모의된 관개 횟수 및 1회 관개시 평균 관개량을 각각 산정하여 비교하였다.

3.4 입력자료

3.4.1 고해상도 기상자료

본 연구에서 사용한 기상자료는 국가농림기상센터에서 생산된 LAMP (Land-Atmosphere Modeling Package)에서 추출한 고해상도 기상자료 (이하 LAMP 자료)가 활용되었다. LAMP는 WRF (Weather Research and Forecasting) 기상모형에 Niu et al. (2011)의 Noah-MP 지면모형을 결합한 고해상도 기상예측모형과, 각 농림지 사이트별로 특화되어 맞춤형으로 구축되는 1차원 모형들로 구성된다 (이승재 외, 2016). 해당 고해상도 기상자료는 실제 농경지 관측자료와 높은 상관계수를 나타내는 것으로 검증된 바 있다 (송지애 외, 2015).

LAMP 자료는 경기도 여주시 및 이천시를 중심으로 원주, 충주, 음성, 진천, 안성, 용인, 광주, 양평 일부를 포함하는 66×63 격자로 구성되었다. 각 격자의 크기는 $810 \text{ m} \times 810 \text{ m}$ 이며, 이는 현재 LAMP에서 제공되는 격자의 크기 중 가장 정확도가 높은 형태를 선택한 것이다 (이승재 외, 2016). **Fig. 3.2**는 LAMP를 통해 얻어진 일별 기상자료의 예시로, 기상자료의 범위를 보여준다.

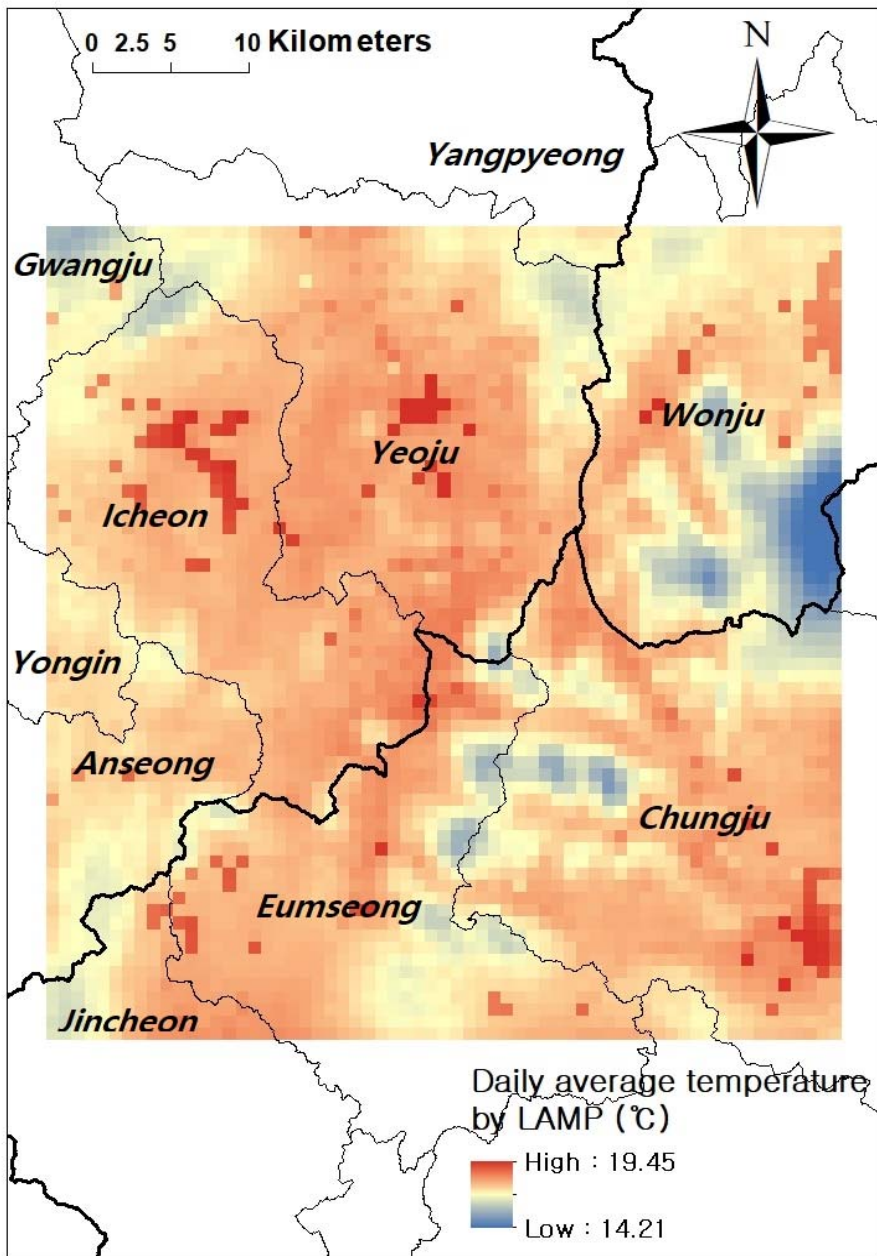


Fig. 3.2 Daily weather data (daily average temperature) map extracted from LAMP coverage with administrative districts.

LAMP 자료는 2016년 시범생산을 통해 구축된 모의자료와 2017년 3월부로 공식 생산되는 예측자료가 있으며, 예측자료의 경우 1회 예측시 11일 자료가 생산되고 일주일에 2회 자료가 갱신된다. 2016년 모의자료는 5월 24일부터 10월 20일까지 기간에 대하여 고해상도 기상자료의 토양수분 모형 적용에 따른 작물 생육기간 중 토양수분 모의 결과 및 순관개량 산정에 사용되었다. 2017년 예측자료의 경우 5월 11일부터 10월 20일까지 기간에 대하여 예측자료를 통한 토양수분 변화 예측 및 순관개량 예측에 사용되었다.

LAMP는 시간별 기상인자를 제공하며, 일별 토양수분 모의를 위해선 일 기상자료로 변환해야 한다. 한편 LAMP는 WRF의 출력자료(Variable)로 설정된 기상인자를 제공하므로, 토양수분 모의를 위해 필요한 기상인자 중 일부는 전처리를 통해 획득하였다. 전처리에 사용된 기상자료 변환식은 다음 **Table 3.2**와 같다.

사용된 일별 기상자료는 최고기온, 최저기온, 평균기온, 평균풍속, 평균상대습도, 순복사량, 강우량이다. 최대, 최소, 평균기온의 경우 시간단위 기온 자료에서 각각 일 최대, 최소, 평균값을 선정하였고, 평균풍속은 시간별 풍속을 스칼라화 하여 계산하였다. 상대습도의 경우 David (1980)가 제안한 식에 기반하여, 순복사량은 에너지 수지에 기반하여 계산되었다. 강우량은 하루 동안 발생한 시간별 대류성 강수와 전선성 강수의 합으로 구해진다.

Table 3.2 Conversion formulas for daily weather data from LAMP variables

Daily weather data	LAMP variable (WRF variable)	Conversion formula	Note
Maximum temperature	T2	$Max [T2_0, T2_1, \dots T2_{23}]$	
Minimum temperature	T2	$Min [T2_0, T2_1, \dots T2_{23}]$	
Average temperature	T2	$(\sum_{t=0}^{23} T2_t)/24$	
Wind speed	U10, V10	$\sum_{t=0}^{23} (\sqrt{U10_t^2 + V10_t^2})$	
Relative humidity	T2, Q2, PSFC	$RH = \frac{Q2}{Q2_s}$ $e_s = 6.112 \times e^{\frac{17.67 T}{T+243.5}}$ $Q2_s = \frac{0.622}{(0.01 PSFC - (1 - 0.622)e_s)}$	(David, 1980)
Net radiation	SWDOWN, ALBEDO, EMISS, GLW, TG	$SWDOWN \times (1 - ALBEDO)$ $+ EMISS \times (GLW - \sigma \times TG^4)$	
Precipitation	RAIN, RAINNC	$\sum_{t=0}^{23} (RAIN_t + RAINNC_t)$	

$t = time (0, 1, 2, \dots 23)$

3.4.2 모의대상지역 및 모의기간

토양수분 모의 및 관개량 산정의 대상지역은 위도 $36.87^{\circ} \sim 37.43^{\circ}$, 경도 $127.28^{\circ} \sim 128.00^{\circ}$ 에 이르는 지역이며, 해당 지역을 700×700 격자로 구성하여 격자별 모의를 수행하였다. 개별 격자의 크기는 $90 \text{ m} \times 90 \text{ m}$ 이며, 격자별로 기상자료는 LAMP 격자와 최근린 보간법 (Nearest neighbor method)을 수행하여 결정하였다. 또한 토지이용도를 기준으로 밭 격자를 선별하였으며, 토성분포도를 기반으로 격자별 토성을 결정하였다. 모의 기간은 후술할 작물계수 및 작물 생육기간에 맞추어 결정하였다.

3.4.3 토지이용자료 및 작물별 작물계수

토지이용자료는 대상지역 내 밭 격자를 선별하기 위해 사용되었으며, 환경부에서 제공하는 중분류토지피복도 1:25,000을 모의대상지역 700×700 격자에 맞추어 사용하였다. 대상지역 내 토지이용 분류 중 밭 격자인 8번에 해당하는 지역이 모의에 이용되었다. 토지피복의 분류 기준은 다음 Table 3.3와 같으며, 대상지역의 토지이용도는 Fig. 3.3와 같다.

Table 3.3 Land use types by code

Code	Type	Code	Type
1	Residential area	11	Other plantation
2	Industrial area	12	Broad-leaved forest
3	Commercial area	13	Coniferous forest
4	Culture, athletic, recreational facilities	14	Mixed forest
5	Traffic area	15	Natural grassland
6	Public utility area	16	Artificial grassland
7	Paddy	18	Inland wetland
8	Upland field	20	Natural bare land
9	Facility plantation	21	Artificial bare land
10	Orchard	22	Inland water

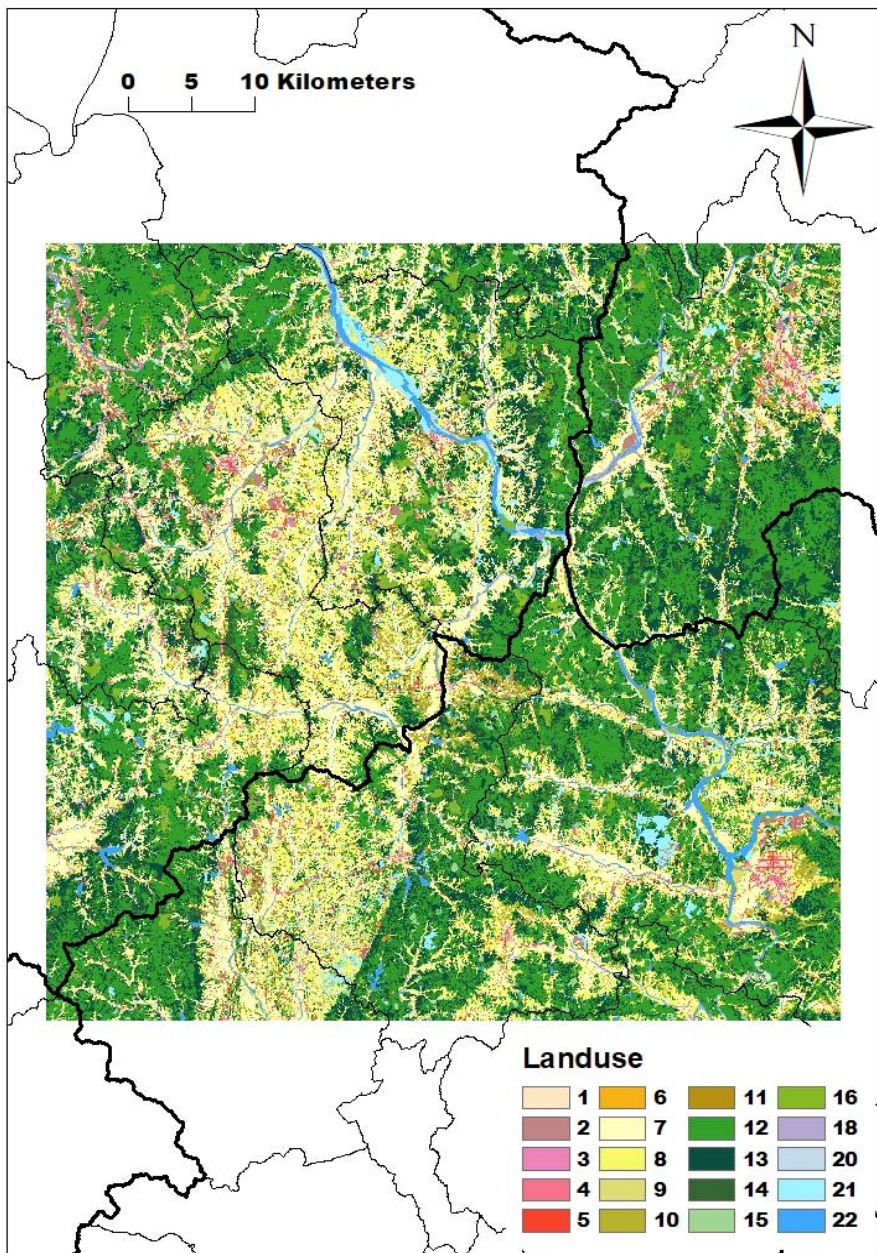


Fig. 3.3 Land use map of the study area.

대상 밭 작물로는 고추, 콩, 참깨를 선정하였고, 작물의 순별 작물계수 및 생육기간은 Table 3.4 ~ 3.6과 같이 나타났다. 작물계수는 정하우 (2005)의 연구에서 측정한 국내 밭작물의 순별 증발산량을 이용하여 FAO Penman-Monteith 방정식에 맞는 순별작물계수를 산정하였다. 생육기간은 고추의 경우 5월 11일부터 10월 20일까지 총 160일, 콩과 참깨의 경우 5월 21일부터 9월 20일까지 총 120일로 설정되었다.

Table 3.4 Crop coefficients for red pepper

5/M	5/L	6/E	6/M	6/L	7/E	7/M	7/L
0.79	0.95	1.09	1.08	1.21	1.16	1.31	1.27
8/E	8/M	8/L	9/E	9/M	9/M	10/E	10/M
1.31	1.43	1.70	1.24	1.13	1.21	1.39	0.89

Table 3.5 Crop coefficients for bean

5/L	6/E	6/M	6/L	7/E	7/M
0.58	0.59	0.53	0.56	0.74	0.79
7/L	8/E	8/M	8/L	9/E	9/M
1.17	1.36	0.97	1.56	1.42	0.82

Table 3.6 Crop coefficients for sesame

5/L	6/E	6/M	6/L	7/E	7/M
0.79	0.67	0.37	0.54	0.64	0.51
7/L	8/E	8/M	8/L	9/E	9/M
0.67	0.89	0.92	1.13	0.92	0.40

3.4.4 토성분포자료 및 토성별 특성자료

토성은 포장용수량, 영구위조점 등 토양수분의 거동 특성에 영향을 주며, 따라서 토양수분 모의에는 토성분포 및 토성별 특성치가 입력자료로 요구된다. 토성자료는 국립농업과학원 토양환경정보시스템의 정밀 토양도를 모의대상지역 700 × 700 격자에 맞추어 사용하였다. 분석대상지의 토성분포는 다음 Table 3.7 및 Fig. 3.4과 같이 나타났으며, 이 중 암반(Rock)으로 분류된 격자의 경우 분석대상지역에서 제외되었다.

Table 3.7 Areal soil texture distribution of the study area

Soil texture	Number of grids	Ratio
Rock	12,812	2.6%
Clay	12,622	2.6%
Silty clay loam	21,460	4.4%
Clay loam	194,043	39.6%
Sandy loam	228,579	46.6%
Sand	20,484	4.2%
Total	490,000	100.0%

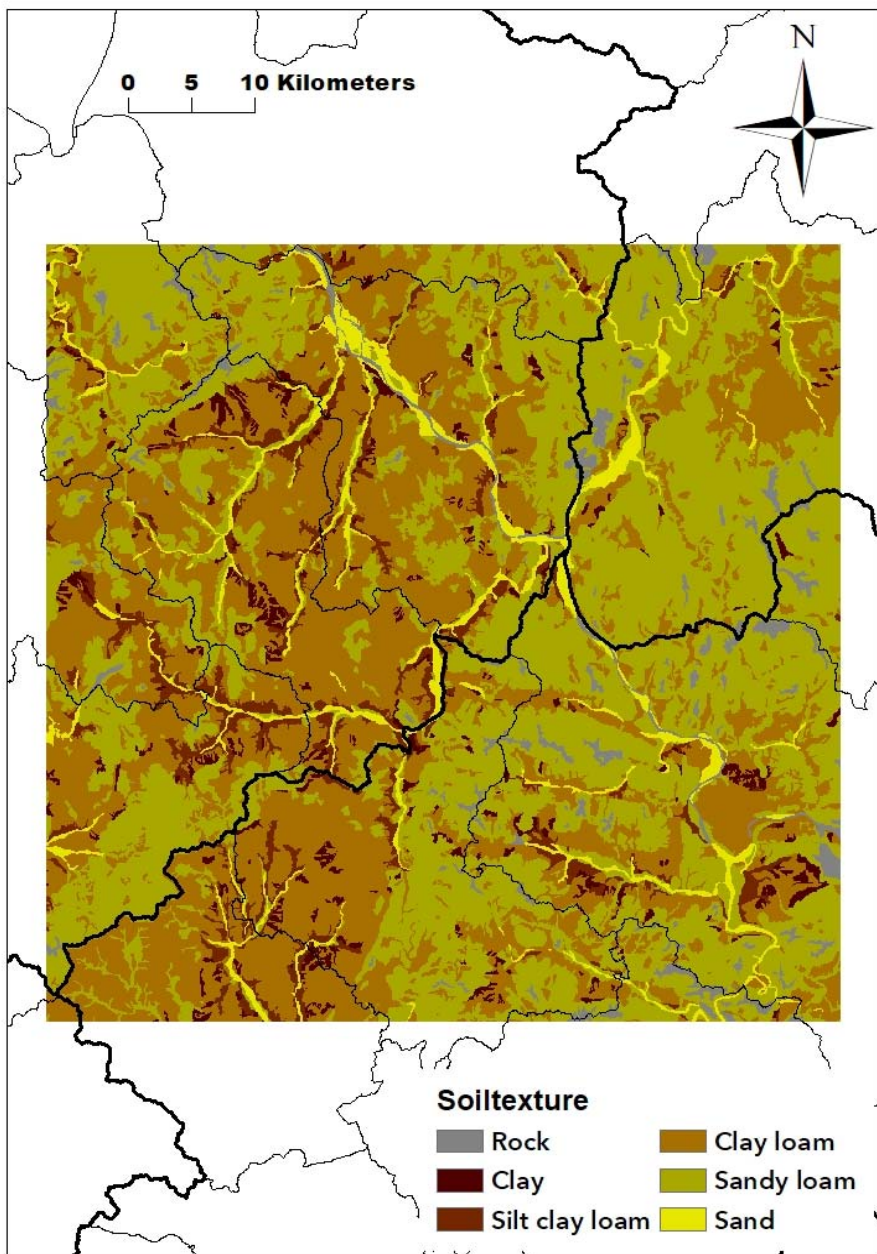


Fig. 3.4 Soil texture map of the study area.

본 연구에서 개선된 토양수분 모형에는 토성별 포장용수량, 영구위조점과 포화수분량 정보가 필요하며, 이는 **Table 3.8**의 값이 적용되었다 (Saxton and Rawls, 2006). 여기서 θ_{FC} 는 포장용수량, θ_{WP} 는 영구위조점, θ_{SAT} 는 포화수분량을 나타낸다.

Table 3.8 Soil texture characteristics (Saxton and Rawls, 2006)

Soil texture	θ_{FC} (m ³ /m ³)	θ_{WP} (m ³ /m ³)	θ_{SAT} (m ³ /m ³)
Clay	0.42	0.30	0.50
Silty clay loam	0.38	0.22	0.51
Clay loam	0.36	0.22	0.48
Sandy loam	0.18	0.08	0.45
Sand	0.10	0.05	0.46

제 4 장 결과 및 고찰

4.1 토양수분 모의 비교 및 검증 결과

토양수분 모의 결과의 검증을 위해 토층별 토양수분 실측치와 모의 결과를 비교하였다. 토양수분 실측 결과는 다음 Table 4.1과 같이 나타났으며, 모의 결과는 Fig. 4.1 ~ 4.3과 같이 나타났다. 토층별 실측치의 변화를 보면 10 cm 지점에서의 관측 결과가 다른 지점에 비해 변동이 크고, 70 cm 지점에서의 관측 결과가 가장 작음을 알 수 있다. 이는 작물의 토양수분 소비형에 따른 것인데, 세 모의 방식에서 모두 이를 반영한 결과를 나타내었다. 70 cm 지점에서의 토양수분 실측치가 거의 변동하지 않는 것은 유효토층이 종료됨을 의미한다. 이는 토양수분 모의를 위해 가정한 4개의 토층이 작물의 실제 유효토층을 포함하고 있음을 보여준다.

10 cm, 30 cm, 50 cm에서의 토양수분 실측치의 경우 많은 강우가 내린 경우 무강우시 하락한 토양수분 대비 10 % 이상 큰 값을 나타내었다. 특히 10 cm 지점의 경우, 무강우시 토양수분이 20 % 이하로 하락한 반면, 7월 5일과 7월 16일에는 강우에 의해 토양수분이 각각 38.0 %, 35.7 %를 기록하였다. 이는 6월 30일에 관측된 관측기간 중 최저값인 16.4 % 대비 각각 21.6 %, 19.3 % 큰 값이다. Saxton and Rawls (2006)에 따르면 포장용수량과 영구위조점 사이의 유효수분의 범위는 사토의 경우 5 %, 사질양토의 경우 10 %으로 보고하였는데, 이는 토양수분의 실측 결과에서 기록된 토양수분의 거동이 유효수분 범위를 초과함을 보여준다.

Table 4.1 Soil moisture contents by soil depth

Date	Effective rainfall (mm)	Soil moisture contents by soil depth (%)			
		10 cm	30 cm	50 cm	70 cm
2016-06-04	0.0	27.0	32.8	35.8	10.9
2016-06-05	0.0	24.7	32.2	35.5	10.8
2016-06-06	0.0	23.3	31.4	35.0	10.7
2016-06-07	0.0	22.9	30.7	34.3	10.6
2016-06-08	0.0	22.4	29.9	33.4	10.6
2016-06-09	0.0	21.9	28.9	32.4	10.5
2016-06-10	0.0	21.4	27.8	31.4	10.4
2016-06-11	0.0	21.0	26.9	30.5	10.3
2016-06-12	0.1	20.8	26.3	29.7	10.2
2016-06-13	0.0	20.5	25.6	29.1	10.0
2016-06-14	0.0	20.0	24.7	28.5	9.9
2016-06-15	2.1	20.8	24.2	28.0	9.8
2016-06-16	0.0	20.5	24.0	27.7	9.7
2016-06-17	0.0	19.7	23.5	27.4	9.6
2016-06-18	0.0	19.1	22.8	26.9	9.5
2016-06-19	0.0	18.6	22.2	26.5	9.4
2016-06-20	0.0	18.2	21.7	26.1	9.4
2016-06-21	0.0	19.6	21.2	25.8	9.3
2016-06-22	0.7	18.3	20.8	25.5	9.3
2016-06-23	0.5	17.8	20.5	25.3	9.2
2016-06-24	15.5	29.2	20.6	25.3	9.2
2016-06-25	0.0	23.2	21.4	25.4	9.2
2016-06-26	0.0	19.9	21.4	25.5	9.2
2016-06-27	0.0	18.5	21.2	25.5	9.2
2016-06-28	0.0	17.6	21.0	25.4	9.2
2016-06-29	0.0	16.8	20.7	25.2	9.2
2016-06-30	0.0	16.4	20.5	25.0	9.1

Table 4.1 Soil moisture contents by soil depth (continued)

Date	Effective rainfall (mm)	Soil moisture contents by soil depth (%)			
		10 cm	30 cm	50 cm	70 cm
2016-07-01	40.8	25.0	20.5	24.9	9.1
2016-07-02	0.7	32.2	24.6	25.3	9.1
2016-07-03	0.0	24.9	25.0	26.5	9.1
2016-07-04	67.0	34.5	27.5	27.6	9.2
2016-07-05	26.8	38.0	37.4	36.6	9.2
2016-07-06	1.5	36.2	36.4	38.4	10.2
2016-07-07	0.0	31.5	34.5	37.2	11.0
2016-07-08	0.0	26.8	32.7	36.1	10.9
2016-07-09	0.0	23.1	30.8	34.7	10.8
2016-07-10	0.0	21.2	29.4	33.3	10.7
2016-07-11	0.1	20.0	28.2	31.9	10.5
2016-07-12	12.6	31.9	28.1	31.4	10.4
2016-07-13	0.0	25.7	28.7	31.7	10.3
2016-07-14	0.0	22.4	28.2	31.4	10.3
2016-07-15	1.1	20.6	27.5	30.8	10.2
2016-07-16	74.6	35.7	29.4	31.4	10.2
2016-07-17	2.1	33.8	31.7	33.7	10.2
2016-07-18	0.0	28.9	31.4	34.0	10.4
2016-07-19	0.0	24.1	30.4	33.5	10.5
2016-07-20	0.0	21.1	29.1	32.5	10.5
2016-07-21	0.0	20.4	28.0	31.5	10.4
2016-07-22	0.0	20.1	26.9	30.4	10.4
2016-07-23	0.0	19.7	25.8	29.3	10.3
2016-07-24	0.3	19.5	25.0	28.5	10.2
2016-07-25	0.0	23.9	24.6	28.1	10.1
2016-07-26	0.0	28.3	25.0	27.9	10.0
2016-07-27	0.0	23.8	24.8	27.9	9.9
2016-07-28	0.0	22.2	24.5	27.7	9.9
2016-07-29	17.0	28.0	24.4	27.5	9.8
2016-07-30	16.2	29.9	25.5	27.7	9.8
2016-07-31	1.7	24.5	25.4	27.9	9.7

Table 4.1 Soil moisture contents by soil depth (continued)

Date	Effective rainfall (mm)	Soil moisture contents by soil depth (%)			
		10 cm	30 cm	50 cm	70 cm
2016-08-01	0.0	21.1	24.9	27.8	9.8
2016-08-02	0.0	20.0	24.5	27.6	9.8
2016-08-03	0.0	19.2	24.0	27.2	9.7
2016-08-04	0.0	18.4	23.2	26.6	9.7
2016-08-05	0.0	17.7	22.5	26.1	9.6
2016-08-06	0.0	17.2	21.9	25.6	9.5
2016-08-07	0.0	16.8	21.3	25.3	9.5
2016-08-08	0.0	16.4	20.8	25.0	9.4
2016-08-09	0.0	21.8	20.5	24.8	9.4
2016-08-10	0.0	22.8	20.6	24.8	9.4
2016-08-11	0.0	18.8	20.6	24.8	9.4
2016-08-12	0.0	23.3	20.5	24.7	9.4
2016-08-13	0.0	25.9	20.8	24.8	9.4
2016-08-14	2.9	20.3	21.2	25.0	9.4
2016-08-15	0.0	18.6	21.2	25.0	9.4
2016-08-16	0.0	22.7	21.2	24.9	9.5
2016-08-17	0.0	33.5	31.7	35.2	9.5
2016-08-18	0.0	25.9	32.1	34.5	9.7
2016-08-19	0.0	22.8	30.2	33.0	9.8
2016-08-20	0.0	21.2	28.6	31.3	9.9
2016-08-21	0.0	20.1	27.3	29.9	9.9
2016-08-22	0.0	19.5	26.3	28.8	9.9
2016-08-23	0.0	22.6	25.4	27.8	9.9
2016-08-24	0.0	25.0	25.0	27.3	9.8
2016-08-25	0.2	20.4	24.7	26.9	9.8
2016-08-26	26.0	28.3	24.5	26.8	9.8
2016-08-27	0.0	24.3	24.8	27.1	9.8
2016-08-28	11.4	21.5	25.0	27.3	9.8
2016-08-29	0.0	21.0	25.0	27.3	9.8
2016-08-30	0.0	20.3	24.9	27.2	9.8
2016-08-31	19.4	24.9	24.8	27.2	9.8

Table 4.1 Soil moisture contents by soil depth (continued)

Date	Effective rainfall (mm)	Soil moisture contents by soil depth (%)			
		10 cm	30 cm	50 cm	70 cm
2016-09-01	0.1	23.2	24.9	27.2	9.8
2016-09-02	3.5	21.5	24.9	27.3	9.8
2016-09-03	0.7	21.3	24.9	27.3	9.8
2016-09-04	0.0	20.7	24.8	27.2	9.8
2016-09-05	0.0	22.9	24.8	27.1	9.8
2016-09-06	0.0	20.5	24.6	27.0	9.8
2016-09-07	0.0	19.9	24.5	26.9	9.8
2016-09-08	1.6	19.6	24.3	26.7	9.8
2016-09-09	0.0	19.4	24.1	26.5	9.8
2016-09-10	0.0	19.2	23.8	26.2	9.8
2016-09-11	0.0	19.1	23.5	25.9	9.8
2016-09-12	0.0	19.0	23.1	25.7	9.7
2016-09-13	0.0	18.8	22.8	25.4	9.7
2016-09-14	0.0	18.6	22.4	25.1	9.7
2016-09-15	0.0	18.5	22.1	24.9	9.7
2016-09-16	0.0	18.6	21.8	24.7	9.7
2016-09-17	34.6	35.3	22.1	24.8	9.7
2016-09-18	0.0	29.8	23.9	26.4	9.7
2016-09-19	0.0	24.5	24.6	27.1	9.7
2016-09-20	0.0	22.0	24.8	27.2	9.8
2016-09-21	0.0	20.8	24.7	27.1	9.8
2016-09-22	0.0	20.1	24.5	26.9	9.8
2016-09-23	0.0	19.5	24.2	26.5	9.7
2016-09-24	0.0	19.1	23.9	26.2	9.7
2016-09-25	0.0	18.9	23.6	26.0	9.7
2016-09-26	0.0	18.8	23.3	25.8	9.7
2016-09-27	0.6	20.3	23.2	25.7	9.7
2016-09-28	0.0	20.8	23.1	25.7	9.7
2016-09-29	0.0	19.5	23.1	25.6	9.7
2016-09-30	0.0	19.1	22.9	25.5	9.7

Table 4.1 Soil moisture contents by soil depth (continued)

Date	Effective rainfall (mm)	Soil moisture contents by soil depth (%)			
		10 cm	30 cm	50 cm	70 cm
2016-10-01	0.0	18.9	22.8	25.4	9.7
2016-10-02	6.7	18.9	22.7	25.3	9.7
2016-10-03	11.0	26.3	22.7	25.3	9.7
2016-10-04	0.0	22.0	22.8	25.3	9.7
2016-10-05	9.5	26.4	22.8	25.3	9.7
2016-10-06	0.0	23.9	22.9	25.4	9.7
2016-10-07	5.8	21.8	23.0	25.5	9.7
2016-10-08	6.6	28.9	23.1	25.5	9.7
2016-10-09	0.0	23.5	23.3	25.7	9.7
2016-10-10	0.0	21.9	23.5	26.0	9.7
2016-10-11	0.0	21.5	23.7	26.2	9.7
2016-10-12	0.0	21.3	23.9	26.4	9.8
2016-10-13	0.0	21.1	24.1	26.5	9.8
2016-10-14	0.0	21.1	24.2	26.6	9.8
2016-10-15	0.0	21.0	24.3	26.7	9.8
2016-10-16	2.2	21.4	24.3	26.7	9.8
2016-10-17	0.3	22.5	24.4	26.7	9.8
2016-10-18	0.0	21.6	24.4	26.8	9.8
2016-10-19	0.0	21.3	24.5	26.8	9.8
2016-10-20	0.0	21.2	24.5	26.8	9.8

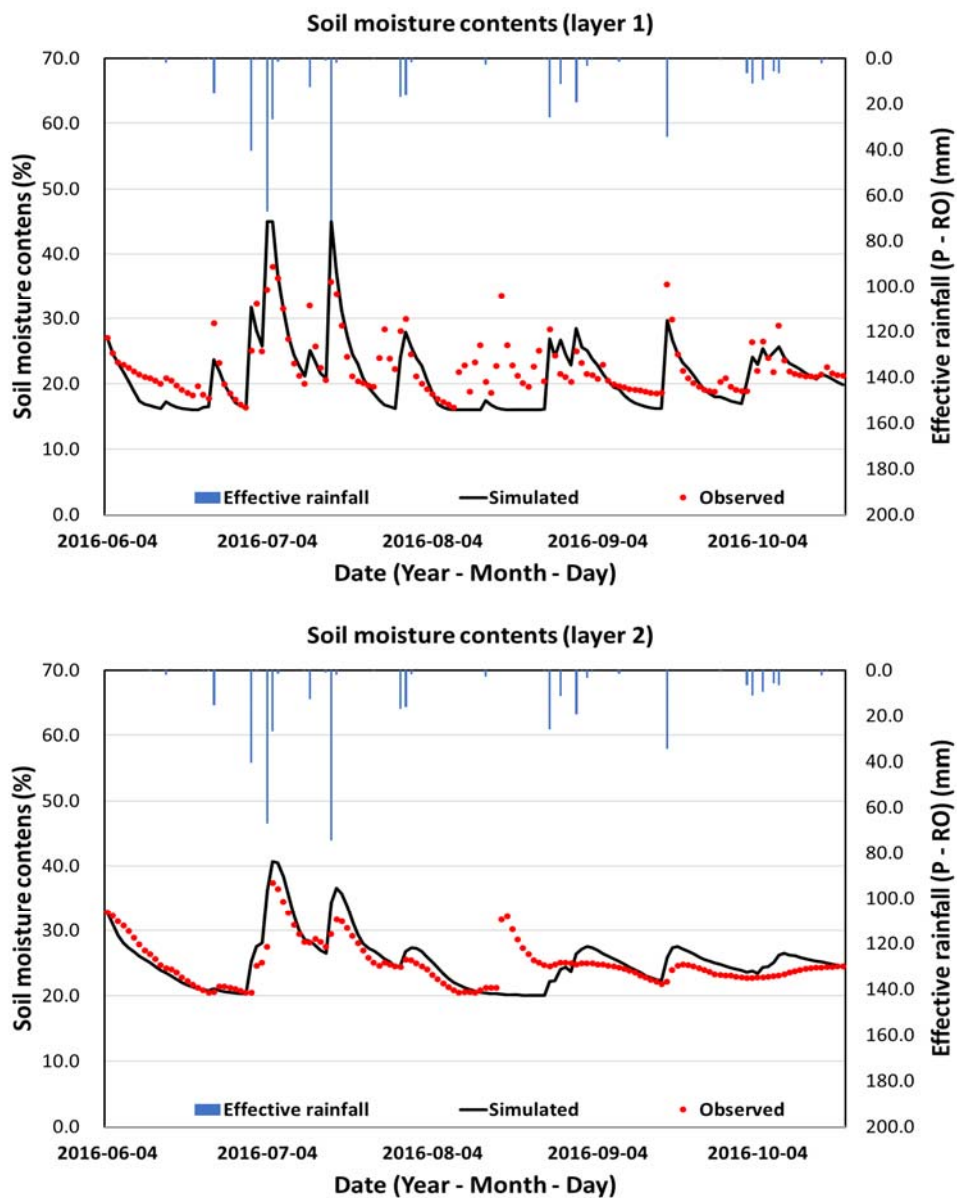


Fig. 4.1 Comparison of soil moisture contents between simulated results and observed data (Type I).

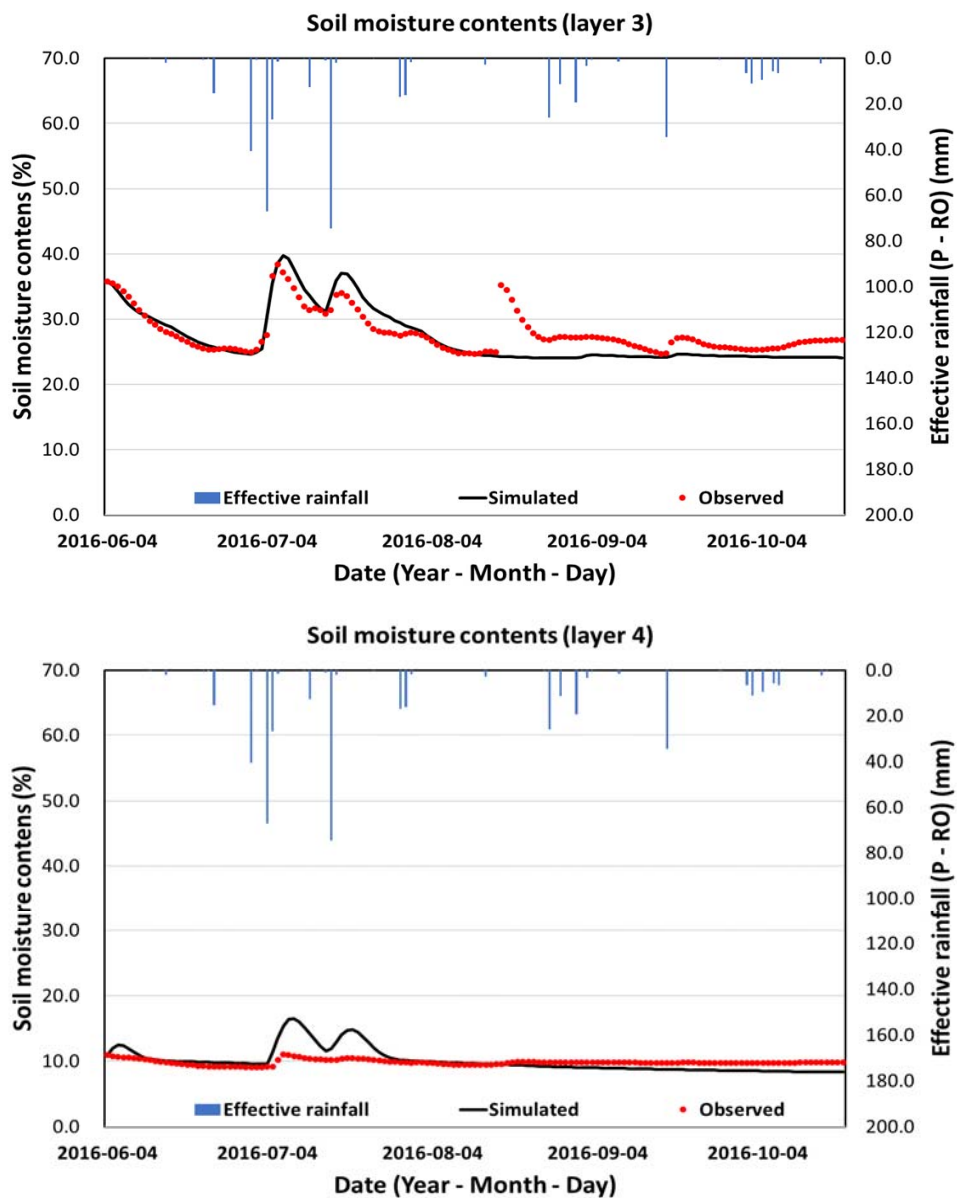


Fig. 4.1 Comparison of soil moisture contents between simulated results and observed data (Type I) (continued).

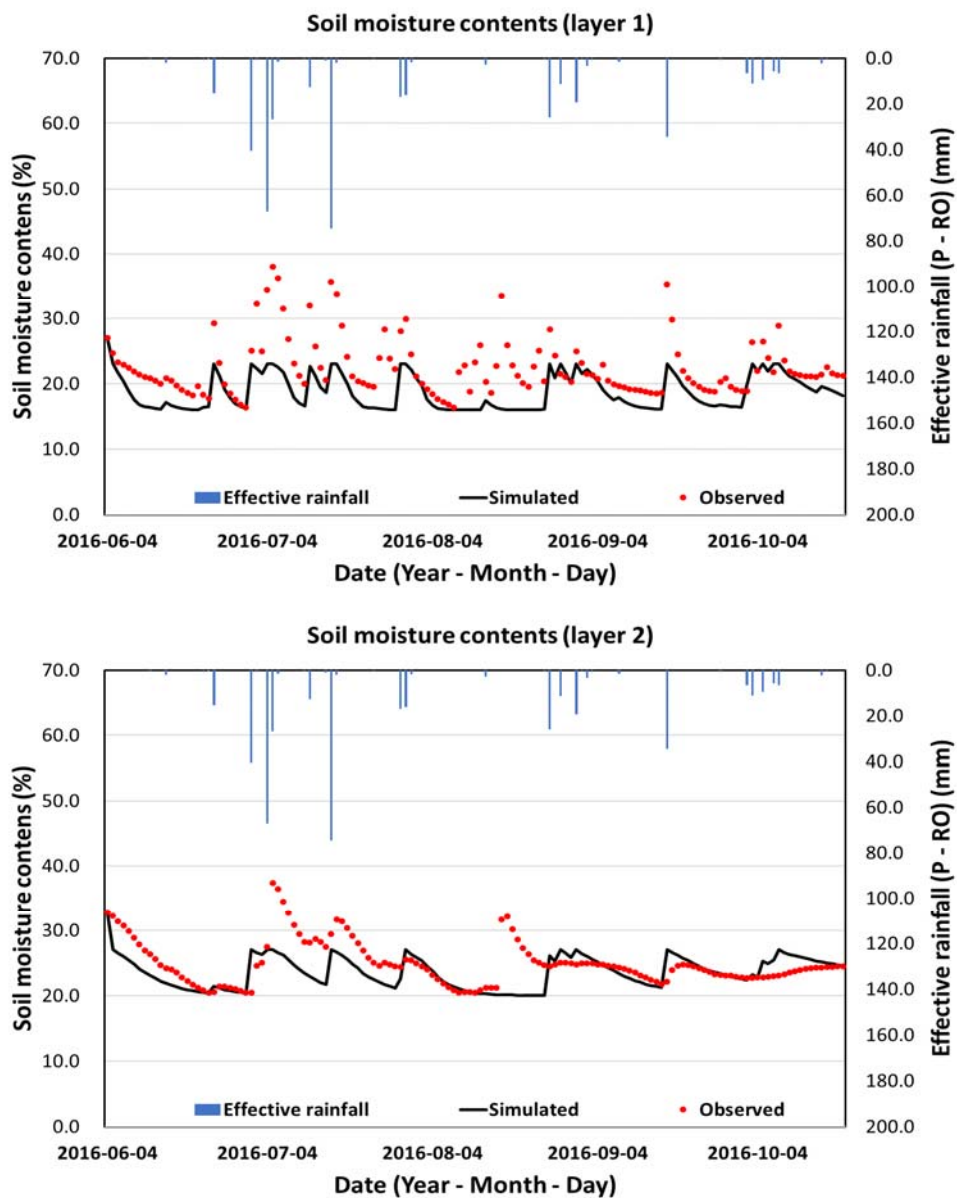


Fig. 4.2 Comparison of soil moisture contents between simulated results and observed data (Type II).

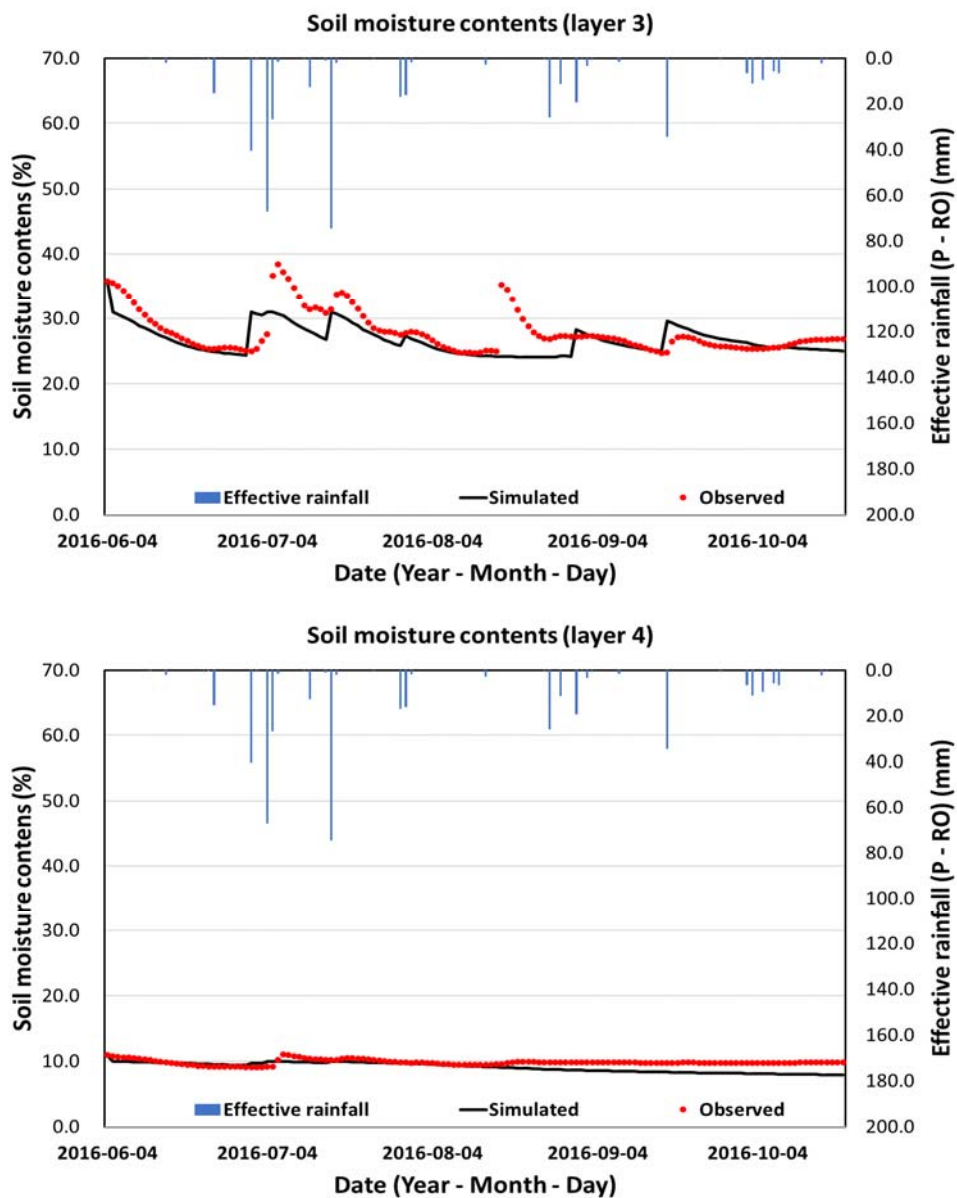


Fig. 4.2 Comparison of soil moisture contents between simulated results and observed data (Type II) (continued).

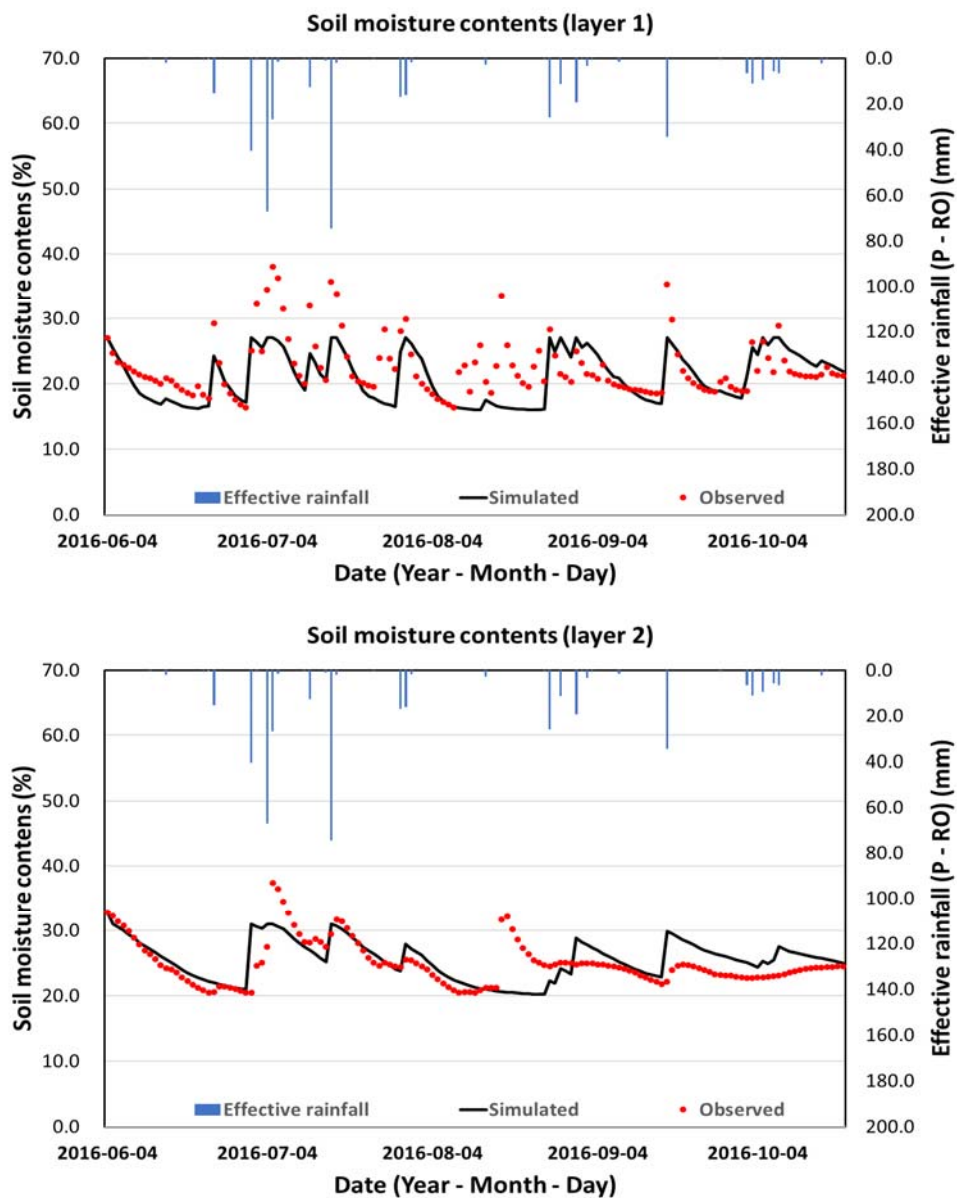


Fig. 4.3 Comparison of soil moisture contents between simulated results and observed data (Type III).

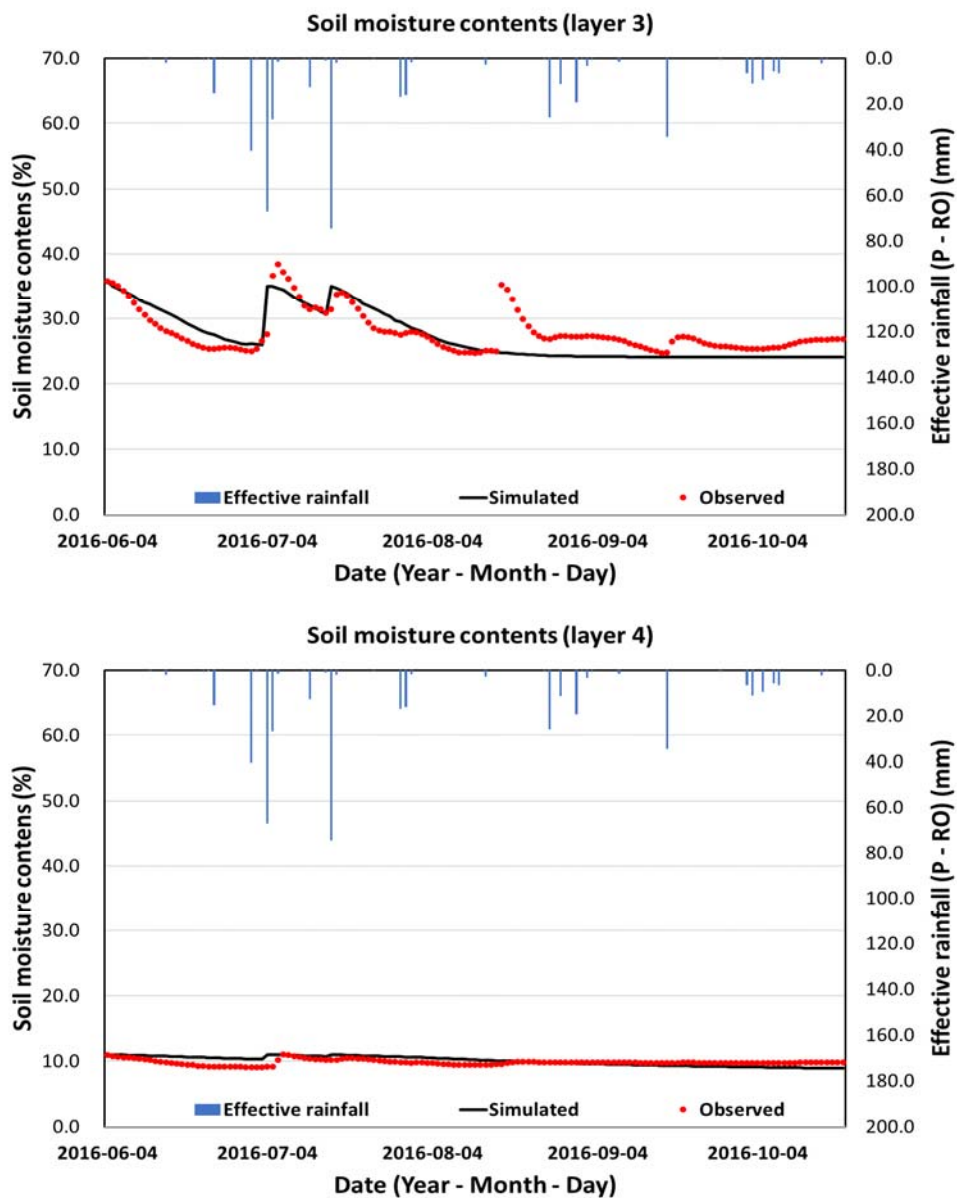


Fig. 4.3 Comparison of soil moisture contents between simulated results and observed data (Type III) (continued).

지연보정계수를 고려한 방식인 Type I의 경우 토양수분 모의의 상한계를 포장용수량이 아닌 포화수분량으로 설정하였으므로, 실제 토양수분의 상승폭을 모의하는데 유리하다. 기존 방식에 따라 토양수분 모의를 수행한 Type II의 경우 포장용수량으로 모의의 상한계가 제한되어 실측치만큼의 토양수분 상승을 모의하지 못하였다. 충분한 강우가 내린 경우에도 토양수분은 설정된 포장용수량까지만 상승하는 것으로 모의되었다. 기존 방식을 이용하고, 매개변수를 조정하여 정확도를 높인 Type III의 경우 Type II에 비해 토양수분 상승폭 모의가 향상된 것으로 확인되었다.

한편 충분한 강우가 발생한 경우 토양수분 실측치가 평상시 토양수분 분포 범위를 초과한 상태가 2일 이상 유지되는 경우가 나타났다. 또한 30 cm, 50 cm에서의 토양수분 관측 결과는 10 cm에서 관측된 결과와 달리, 강우에 따른 토양수분 상승이 그 다음날에도 이어지는 경우가 나타났는데, 이는 상부의 수분 유입이 하부에 도달하기까지 시간이 소요되기 때문으로 판단된다. 이러한 결과들은 종합적으로 기존 모의방식에서 가정한 포장용수량 이상의 토양수분이 즉시 배수됨이 옳지 않음을 보여준다.

다음 Table 4.2와 Table 4.3은 7월 15일 ~ 7월 17일 중 강우에 따른 실측 토양수분 변동 및 모의 토양수분 변동을 정리한 것이다. 7월 15일, 7월 16일, 7월 17일의 일별 강우량은 1.1 mm, 74.6 mm, 2.1 mm로 7월 16일에 많은 강우가 내린 기록이 존재하는데, 이 기간에 대해서 10 cm, 30 cm, 50 cm의 토양수분 변동을 보면 7월 15일 각각 20.6 %, 27.5 %, 30.8 %, 7월 16일 35.7 %, 29.4 %, 31.4 %, 7월 17일 33.8 %, 31.7 %, 33.7 %으로 기록되었다. 해당 기간동안 토양수분 변화는 강우량과 토양수분 변화 정도로 보아 7월 16일의 강우에 의한 것으로 판단되는데, 10 cm 지점의 경우 7월 16일에 가장 큰 토양수분 상승이 이루어진 후 7월 17일에 소폭 감소한 반면, 30 cm 지점과 50 cm 지점은 7월 17일까지 계속 상승하였고, 50 cm 지점에서는 강우가 발생한 7월 16일이 아닌 그 다음날인 7월 17일의 토양수분 상승량이 더 크게 기록되었다.

Table 4.2 Observed soil moisture variation by soil depth ('16. 7.15 ~ 7.17.)

Date	Soil moisture variation by soil depth (%)		
	10 cm	30 cm	50 cm
7/15	20.6	27.5	30.8
7/16	35.7 (+15.1)	29.4 (+1.9)	31.4 (+0.6)
7/17	33.8 (-1.9)	31.7 (+2.3)	33.7 (+2.3)

Table 4.3 Simulated soil moisture variation by soil layer ('16. 7.15 ~ 7.17.)

Type	Date	Soil moisture variation by soil layer (%)		
		Layer 1	Layer 2	Layer 3
I	7/15	20.8	26.4	31.2
	7/16	45.0 (+24.2)	34.4 (+8.0)	33.6 (+2.4)
	7/17	37.1 (-7.9)	36.5 (+2.1)	35.9 (+2.3)
II	7/15	18.6	21.7	26.7
	7/16	23.0 (+4.4)	27.0 (+5.3)	31.0 (+4.3)
	7/17	23.0 (-)	26.7 (-0.3)	30.7 (-0.3)
III	7/15	20.6	25.2	30.7
	7/16	27.0 (+6.4)	31.0 (+5.8)	35.0 (+4.3)
	7/17	27.0 (-)	30.7 (-0.3)	34.7 (-0.3)

Type I의 경우 7월 16일 강우에 의해 세 토층 모두 7월 15일 대비 토양수분이 상승한 후, 7월 17일 토층 1에서 전일대비 감소, 토층 2와 3에서 전일대비 증가를 나타내었다. 토층 2와 토층 3이 7월 17일에 증가한 것은 지연보정계수에 따라 포장용수량을 초과하는 수분량이 전일 토층 1에서 잔류 후 하강하였기 때문이다. 이는 각 토층에 대응되는 10, 30, 50

cm 지점의 실측자료의 경향과 일치하는 결과이다. Type II와 III의 경우 7월 16일 발생한 강우에 의해 모든 토층이 설정된 포장용수량에 도달한 후 과잉량은 배수된 것으로 모의되었다. 그 결과 30, 50 cm 지점에서의 실측결과와 달리 토층 2와 3에서 토양수분이 감소하는 결과를 나타내었다.

Table 4.4는 토층별 토양수분 모의 결과와 실측 결과간의 R^2 및 RMSE값을 구한 결과이다. Type I의 경우 R^2 값은 각각 0.58, 0.54, 0.67, 0.48로 나타났으며, RMSE값은 각 토층에 대하여 3.88 %, 2.84 %, 2.53 %, 1.61 %로 계산되었는데, 이는 Type II, III에 비해 토층 4의 RMSE를 제외하고는 가장 우수한 성능을 나타낸 것이다. Type I의 R^2 가 상대적으로 높게 나타난 것은 기존 방식의 모의에 비해 토양수분의 상승 혹은 하강 경향이 실측치와 유사하게 모의됨을 의미한다.

Type II의 경우 R^2 값은 0.42, 0.18, 0.36, 0.11로 토층 1을 제외하고는 모두 0.4보다 작게 나타났으며, RMSE는 5.03 %, 3.52 %, 2.88 %, 1.03 %으로 강우에 의해 토양수분량이 크게 상승하는 토층 1에서 가장 많은 오차가 발생하였다. Type III의 경우 R^2 가 0.34, 0.30, 0.56, 0.11, RMSE가 4.03 %, 3.12 %, 2.64 %, 0.73 %로 Type II보다 일부 나은 결과를 보이기도 하였다. 다만 Type III의 경우 포장용수량과 유효수분량이 달라졌으므로, 이를 기준으로 할 경우 수분스트레스와 작물증발산량이 달라질 수 있으며, 관개의 여부 판단도 실제와는 다르게 나타날 수 있다.

토양수분 실측치와 모의치간 비교를 수행한 결과, 세 모의 방식 중 지연보정계수를 적용한 Type I이 실측 토양수분의 정성적인 거동 특성을 가장 잘 모사하였으며, 정량적으로도 유사도가 높아 토양수분 모의에 적용하기 적합한 것으로 판단하였다. 한편 검증기간 중 8월의 토양수분 실측치와 모의치간 확인한 차이가 나타났다. 이는 토양수분 모의가 무관개를 가정으로 수행된 반면, 실제 현장에서는 8월 중 지속된 가뭄으로 인하여 농민이 관개를 수행하였고, 이로 인해 오차가 발생하게 되었다. 농민에 의한 관개량을 정량화 할 수 없어 부득이 모의에는 반영되지 못하였으나, 이를 반영할 경우 실측치와 모의치간 오차는 더 작아질 것이다.

Table 4.4 Validation results for soil moisture simulations

Type	Item	Layer 1 (10 cm)	Layer 2 (30 cm)	Layer 3 (50 cm)	Layer 4 (70 cm)
I	R^2	0.58	0.54	0.67	0.48
	RMSE	3.88	2.84	2.53	1.61
II	R^2	0.42	0.18	0.36	0.11
	RMSE	5.03	3.52	2.88	1.03
III	R^2	0.34	0.30	0.56	0.11
	RMSE	4.03	3.12	2.64	0.73

* RMSE: Volumetric percent

본 연구에서 토양수분 모의를 수행한 목적은 관개용수량을 산정하는 것이므로, 각 토양수분 모의 결과를 바탕으로 관개모의를 수행할 경우 나타나는 차이를 확인할 필요가 있다. 따라서 토양수분 모의기간과 동일한 모의기간에 대하여 관개모의 및 기간 중 총 순관개량 산정을 수행하였다.

Fig. 4.4 ~ 4.6은 각 토양수분 모의 방식에 따른 관개 모의 시 제한토층인 토층 1의 변화를 보여준다. 세 모의방식 모두 관개 기준을 작물의 토양수분 스트레스를 기점으로 설정하였기 때문에 모의된 토양수분은 용이토양수분량 이상으로 유지되었다. Type I과 II의 경우 포장용수량과 영구위조점까지 동일하여 무강우시에는 토양수분 거동 및 관개 수행이 유사하게 나타난 반면, 강우가 발생한 경우 두 모의 방식에 관개 판단이 다르게 나타났다. 특히 7월과 같이 충분한 강우가 지속적으로 발생한 경우, Type I은 토양수분이 포장용수량 이상으로 모의되고, 배수되기까지 시간이 반영되어 관개가 불필요한 것으로 판단하였으나, Type II는 포장용수량 이상의 토양수분이 즉시 배수된 것으로 모의하여 지속적으로 관개가 필요한 것으로 판단하는 차이를 보였다. Type III의 경우 Type I, II보다 포장용수량을 높게 설정하였으므로, 무강우시 토양수분 변동폭과 1회 관개시 관개량이 더 크게 모의되었다.

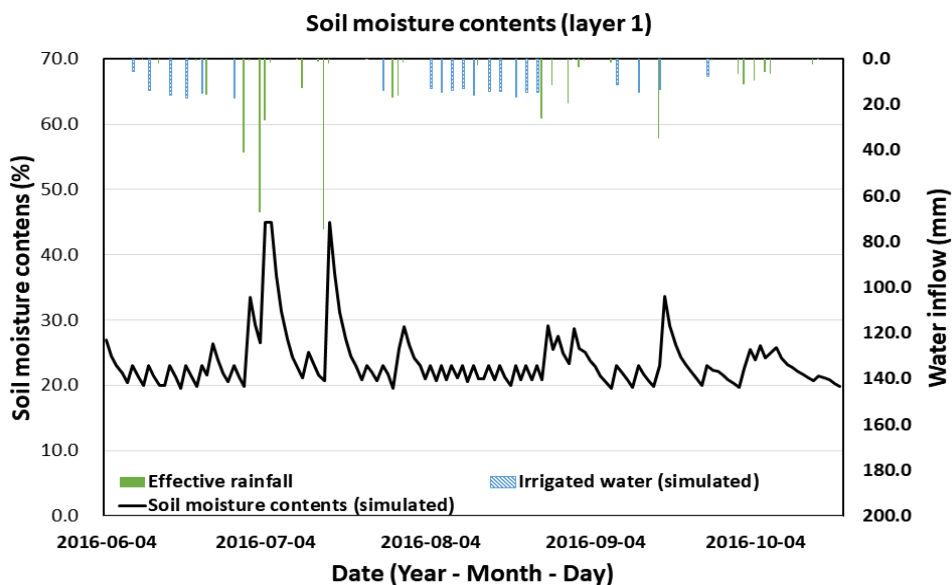


Fig. 4.4 Soil moisture contents in irrigated condition (Type I, layer 1).

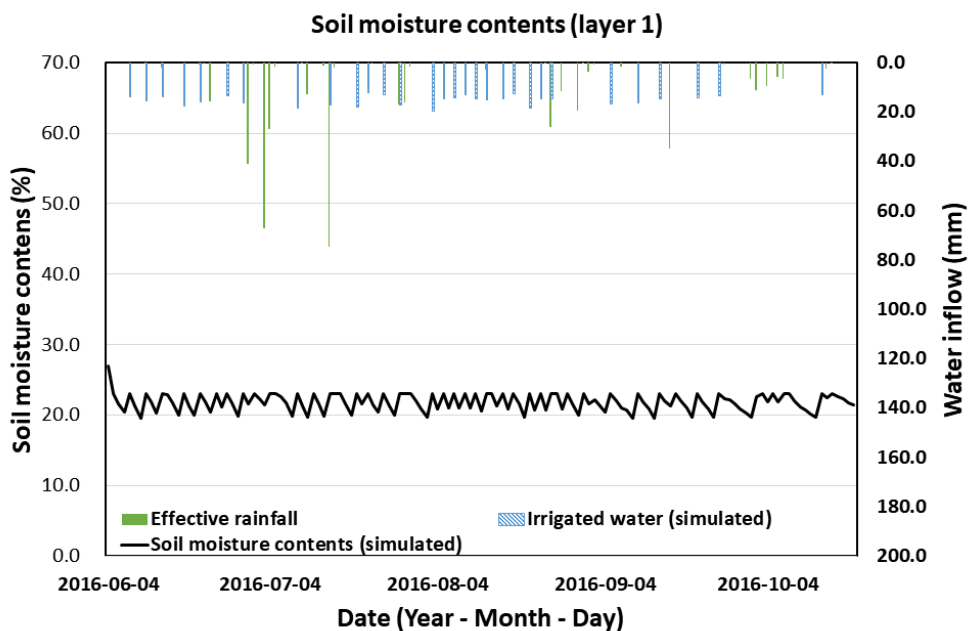


Fig. 4.5 Soil moisture contents in irrigated condition (Type II, layer 1).

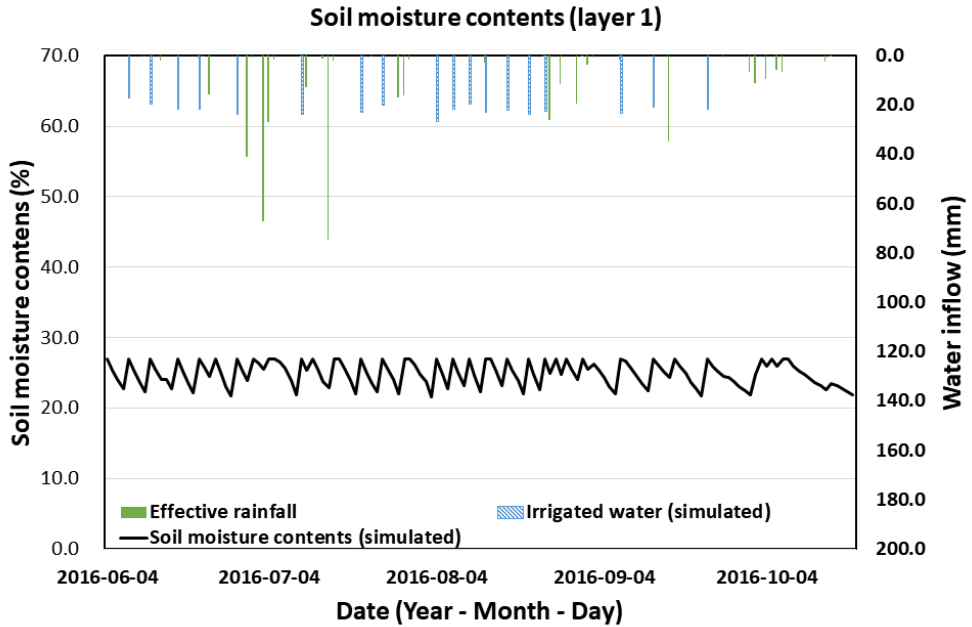


Fig. 4.6 Soil moisture contents in irrigated condition (Type III, layer 1).

관개 모의 결과를 정량적으로 정리한 결과는 다음 Table 4.5와 같이 나타났다. 모의기간 중 총 순관개량은 Type I, II, III에서 각각 287.9 mm, 455.9 mm, 395.5 mm로 나타났다. 관개 횟수는 Type I, II, III에서 각각 22회, 30회, 18회로 나타났으며, 1회 관개시 평균 순관개량은 각각 13.1 mm, 15.2 mm, 22.0 mm로 계산되었다.

Table 4.5 Simulated net irrigation requirements ('16. 6. 4. ~ 10.20.)

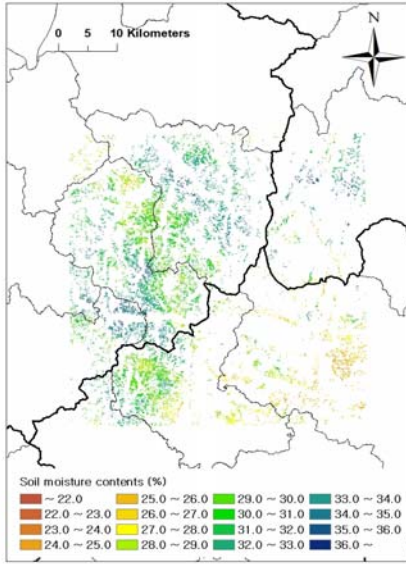
Type	Total net irrigation requirements (mm)	Number of irrigation (counts)	Average net irrigation requirements (mm)
I	287.9	22	13.1
II	455.9	30	15.2
III	395.5	18	22.0

Type I은 포장용수량 이상으로 모의된 토양수분이 즉시 배제되지 않았기 때문에, 작물에 공급되는 수량 중 강우에 의한 수량 공급량이 커져 관개 요구량이 줄어들게 된다. 동시에 강우 이후 토양수분이 용이토양수분량 이하로 저감되기까지 시간이 길어지며, 관개가 필요해지기 전 강우가 발생하여 토양수분 상승이 이루어질 수 있기 때문에 포장용수량 등 매개변수가 동일하게 설정된 Type II보다 더 적은 관개 횟수가 모의되었다. 한편 Type III는 포장용수량을 높게 설정하여 같은 토양수분 모의 방식을 사용하는 Type II에 비해 토양수분 모의 성능은 향상시킬수 있었으나, 관개 모의 시 1회 관개량이 크게 산정되는 결과가 나타났다. 이러한 결과들은 관개용수량 산정을 위한 토양수분 모의 시 기존 모의방식을 이용하는 것은 한계가 있으며, 오차가 발생함을 보여준다.

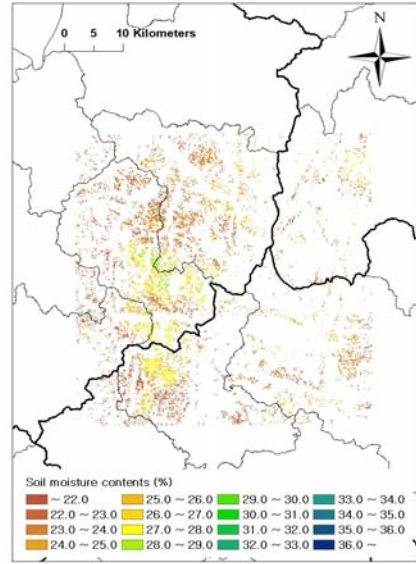
4.2 고해상도 기상자료 적용 토양수분 모의 결과

앞선 연구 결과를 통해 검증한 자연보정계수를 고려한 토양수분 모의 방식을 바탕으로, 고해상도 기상자료를 이용하여 고추의 경우 2016년 5월 24일부터 10월 20일까지, 콩과 참깨의 경우 2016년 5월 24일부터 9월 20일까지 연구 대상지역에 대하여 토양수분 모의를 수행하였다. 대상지역에 LAMP 기상모의자료의 범위, 정밀토양도에 따른 암반지역 제거, 중분류토지피복도에 따른 밭 지역 격자 선별을 거쳐 총 48,402개 격자에 대한 토양수분 모의가 수행되었다. 분석대상지역중 가장 많은 토성은 29,778개 (61.5%)로 식양토 (Clay loam)였으며, 사양토 (Sandy loam) 12,197개 (25.2%), 미사질식양토 (Silty clay loam) 2,598개 (5.4%), 식토 (Clay) 2,119개 (4.4%), 사토 (Sand) 1,710개 (3.5%) 순으로 나타났다.

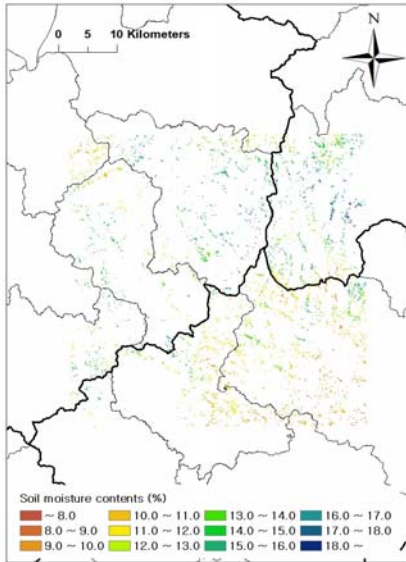
Fig. 4.7은 고추에 대하여 식양토와 사양토 지역의 토층 1에서의 일별 토양수분 모의 결과 중 일부를 나타낸 것이다. 각 결과를 개별적으로 보면, 동일한 조건에서도 지역에 따라 토양수분 값에 차이가 나타남을 알 수 있다. 이는 LAMP 자료가 매 810 m 마다 격자와 기상 모의결과가 달라지므로, 해당 수준의 지역적 기상 편차가 토양수분 모의에 반영된 결과이다. (a), (b), (e)의 결과는 시간에 따른 토양수분의 변화를 보여준다. (a), (b), (e)로 시간이 흐름에 따라 토양수분은 전반적으로 감소하였다가 증가하였지만, 개별 격자별로 감소 혹은 증가의 폭이 다름을 알 수 있다. (a)와 (c), (b)와 (d)는 동일한 조건에서 토성이 다른 두 격자들간의 결과를 보여준다. 두 토성간 토양수분값에 편차는 이는 식양토와 사양토의 토양수분 거동의 범위가 다르기 때문이다. (e), (f), (g), (h)의 결과는 동일한 시점 및 지점에 대하여 토층별로 토양수분의 변동이 다르게 나타남을 보여준다. 동일한 방식으로 콩과 참깨에 대해서도 토양수분 모의가 수행되었으며, 이는 Fig. 4.8와 Fig. 4.9과 같이 나타났다.



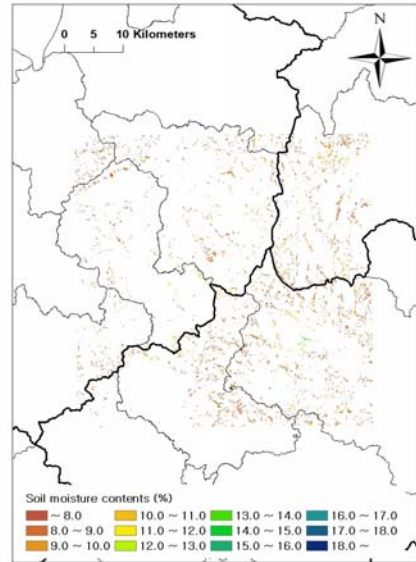
(a) '16. 7.15.
(Clay loam, layer 1)



(b) '16. 8.15.
(Clay loam, layer 1)

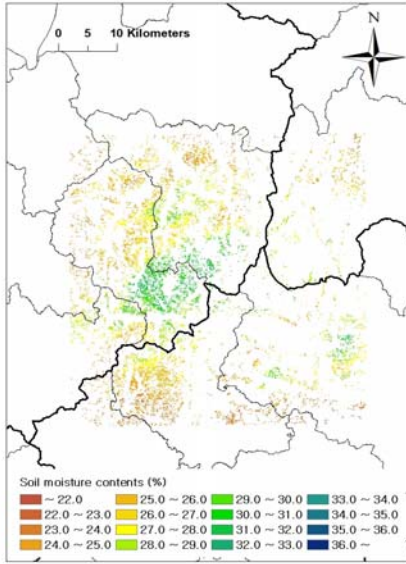


(c) '16. 7.15.
(Sandy loam, layer 1)

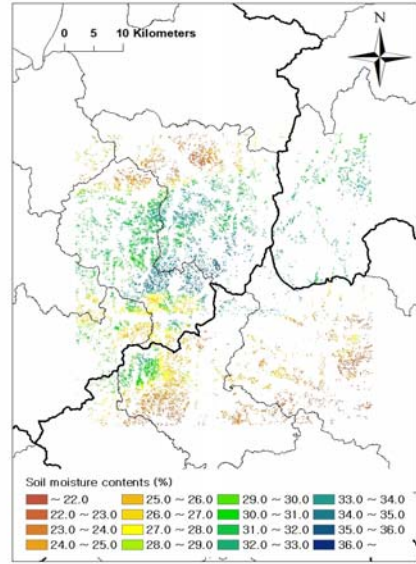


(d) '16. 8.15.
(Clay loam, layer 1)

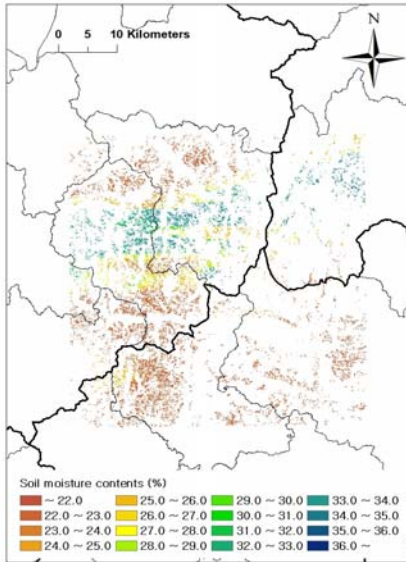
Fig. 4.7 Spatially detailed soil moisture contents of the study area (red pepper).



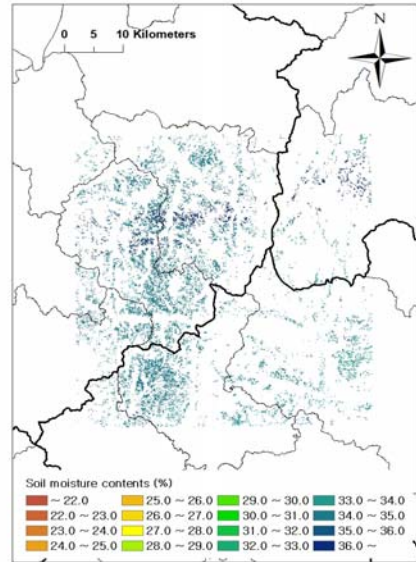
(e) '16. 9.15.
(Clay loam, layer 1)



(f) '16. 9.15.
(Clay loam, layer 2)

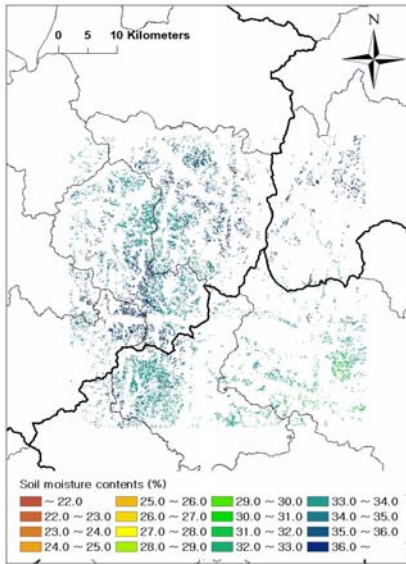


(g) '16. 9.15.
(Clay loam, layer 3)

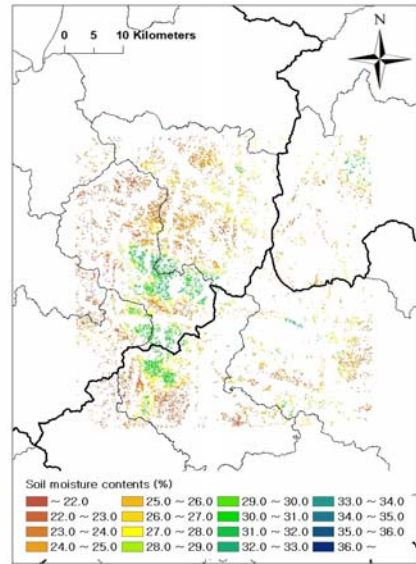


(h) '16. 9.15.
(Clay loam, layer 4)

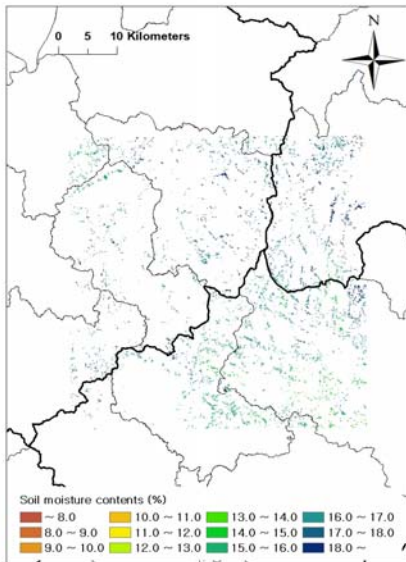
Fig. 4.7 Spatially detailed soil moisture contents of the study area (red pepper) (continued).



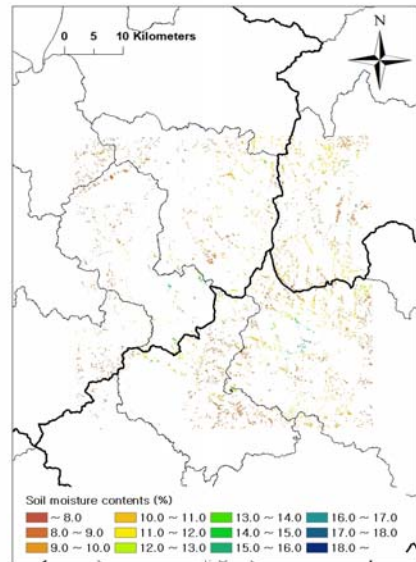
(a) '16. 7.15.
(Clay loam, layer 1)



(b) '16. 8.15.
(Clay loam, layer 1)

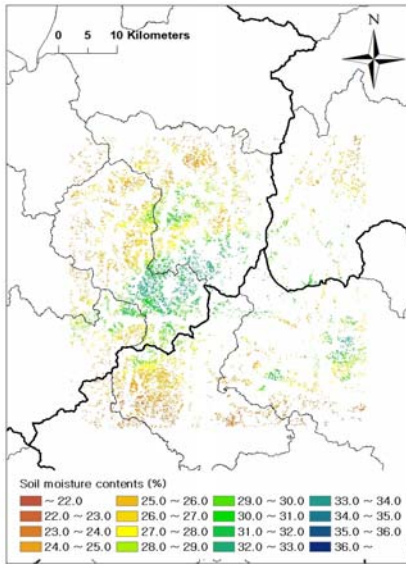


(c) '16. 7.15.
(Sandy loam, layer 1)

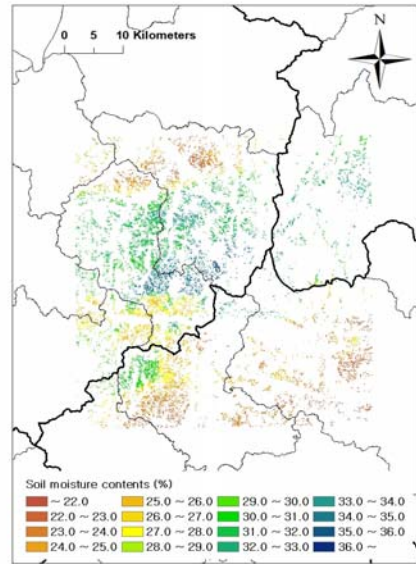


(d) '16. 8.15.
(Clay loam, layer 1)

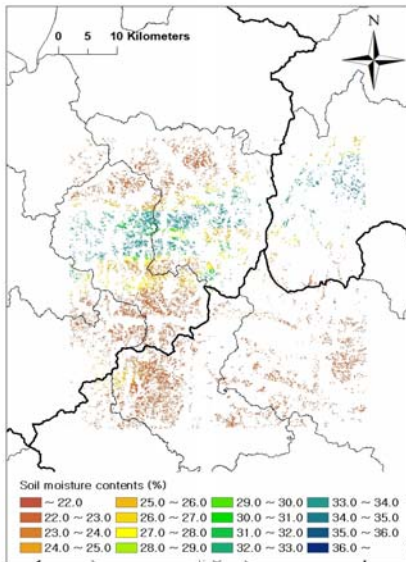
Fig. 4.8 Spatially detailed soil moisture contents of the study area (bean).



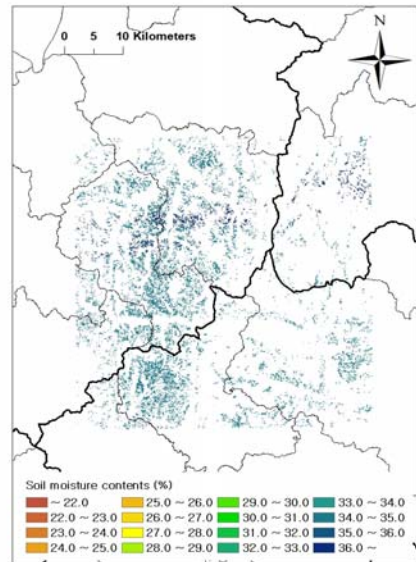
(e) '16. 9.15.
(Clay loam, layer 1)



(f) '16. 9.15.
(Clay loam, layer 2)

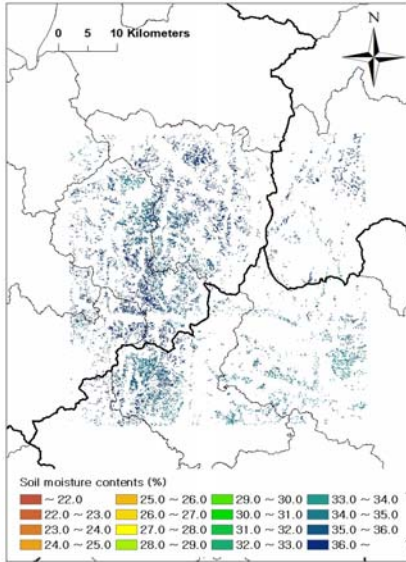


(g) '16. 9.15.
(Clay loam, layer 3)

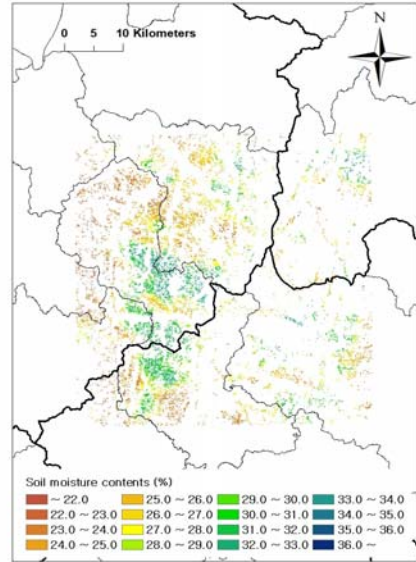


(h) '16. 9.15.
(Clay loam, layer 4)

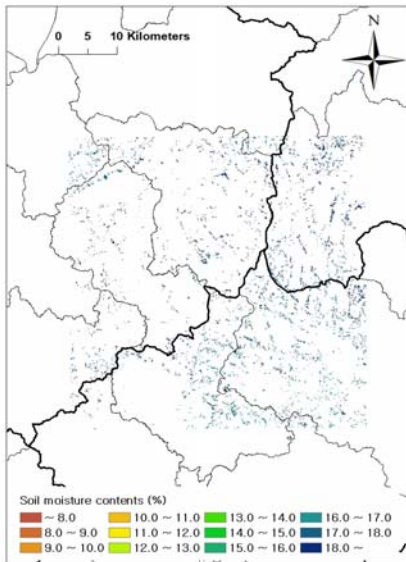
Fig. 4.8 Spatially detailed soil moisture contents of the study area (bean) (continued).



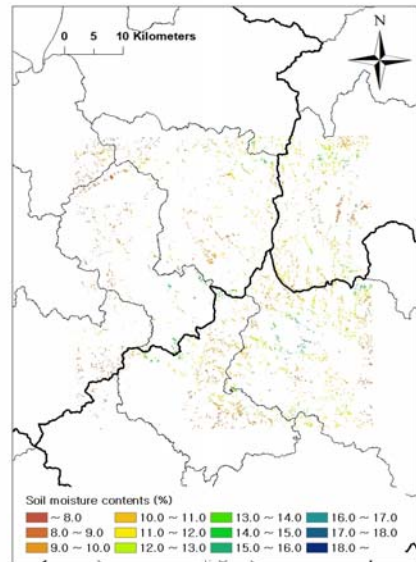
(a) '16. 7.15.
(Clay loam, layer 1)



(b) '16. 8.15.
(Clay loam, layer 1)

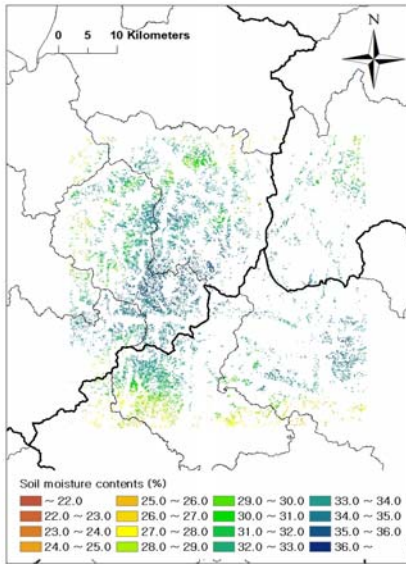


(c) '16. 7.15.
(Sandy loam, layer 1)

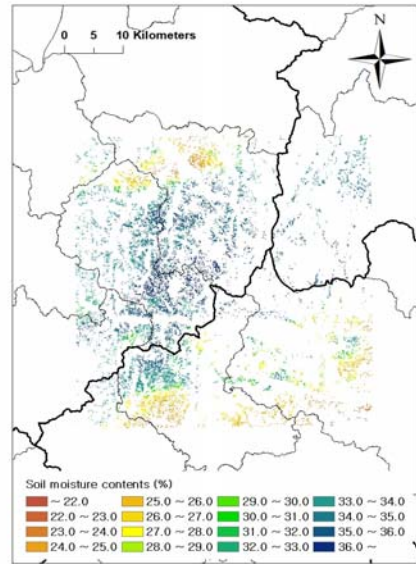


(d) '16. 8.15.
(Clay loam, layer 1)

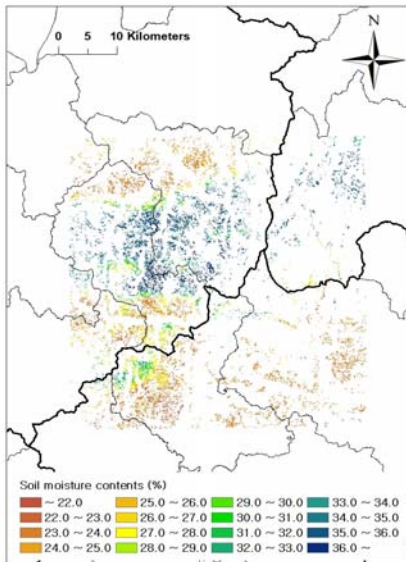
Fig. 4.9 Spatially detailed soil moisture contents of the study area (sesame).



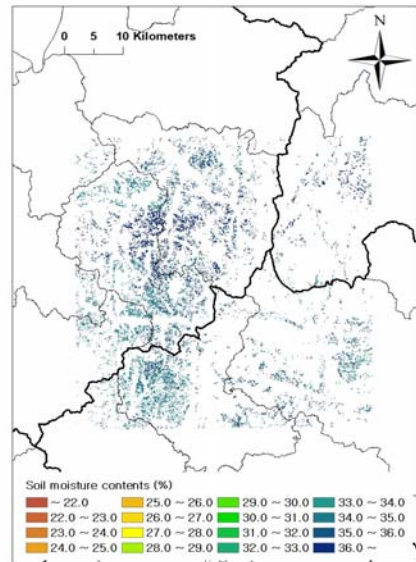
(e) '16. 9.15.
(Clay loam, layer 1)



(f) '16. 9.15.
(Clay loam, layer 2)



(g) '16. 9.15.
(Clay loam, layer 3)



(h) '16. 9.15.
(Clay loam, layer 4)

Fig. 4.9 Spatially detailed soil moisture contents of the study area (sesame) (continued).

토양수분의 공간적 변동을 정량적으로 나타내기위해 2016년 9월 15일을 기준으로 전체 토양수분 격자에 대하여 토성 및 토층별 토양수분을 정리한 결과는 Table 4.6 ~ 4.7과 같다. 고추의 경우 토층 1을 기준으로 다섯 토성의 해당일의 토양수분 평균값은 각각 식양토 26.8 %, 사양토 9.9 %, 미사질식양토 28.7 %, 식토 32.9 %, 사토 5.3 %로 각각의 용이토양수분량 (식양토 : 29%, 사양토 : 13%, 미사질식양토 : 30%, 식토 36%, 사토 7.5%)보다 작게 모의되었는데, 따라서 해당 시점에는 모든 토성에 대하여 고추 재배지에 전반적으로 관개가 필요한 것으로 판단된다. 반면 사토를 제외한 네 토성에서는 최댓값이 각각의 용이토양수분량보다 큰 것으로 나타났는데, 이를 통해 일부 지점에서는 관개가 반드시 필요한 것은 아님을 알 수 있다. 콩의 경우 토성별 토양수분 평균값은 식양토 27.2 %, 사양토 10.4 %, 미사질식양토 29.1 %, 식토 33.3 %, 사토 5.5 %로 전반적으로 관개가 필요한 것으로 나타났다.

참깨의 경우, 해당일의 토성별 토양수분 평균값은 식양토 32.4 %, 사양토 14.4 %, 미사질식양토 34.7 %, 식토 38.0 %, 사토 7.6 %로 고추와 콩과 달리 각각의 용이토양수분량보다 크게 모의되었다. 하지만 참깨의 경우에도 공간적인 토양수분 변동이 있음을 알 수 있고, 일부 지역의 경우 관개가 필요한 시점임을 알 수 있다.

이상의 결과들은 토양수분 분포의 지역적 편차에 의해 관개 계획이 달라질 수 있음을 의미하며, 고해상도 기상자료를 적용할 경우 이를 반영할 수 있음을 보여준다는 의의가 있다.

Table 4.6 Variation of estimated soil moisture contents for red pepper ('16. 9.15.)

Soil texture	Number of grids	Layer	Range (%)	Average (%)	Standard deviation (%)
Clay loam	29,778	Layer 1	22.5 ~ 31.7	26.8	2.2
		Layer 2	22.1 ~ 35.3	28.5	3.9
		Layer 3	22.0 ~ 35.4	25.1	4.3
		Layer 4	32.2 ~ 36.4	34.3	0.7
Sandy loam	12,197	Layer 1	8.1 ~ 13.6	9.9	1.2
		Layer 2	8.2 ~ 17.3	12.6	2.4
		Layer 3	8.0 ~ 17.7	11.0	3.3
		Layer 4	15.5 ~ 18.8	16.5	0.9
Silty clay loam	2,598	Layer 1	23.3 ~ 33.7	28.7	2.3
		Layer 2	22.0 ~ 37.2	28.6	4.5
		Layer 3	22.0 ~ 35.9	24.3	3.9
		Layer 4	33.9 ~ 38.1	36.1	0.5
Clay	2,119	Layer 1	30.4 ~ 37.2	32.9	1.7
		Layer 2	30.2 ~ 40.7	34.6	2.9
		Layer 3	30.0 ~ 40.9	32.1	3.1
		Layer 4	39.6 ~ 42.1	40.2	0.6
Sand	1,710	Layer 1	5.0 ~ 6.2	5.3	0.2
		Layer 2	5.1 ~ 9.3	6.8	1.1
		Layer 3	5.0 ~ 9.8	6.8	1.5
		Layer 4	7.7 ~ 10.6	9.1	1.0

Table 4.7 Variation of estimated soil moisture contents for bean ('16. 9.15.)

Soil texture	Number of grids	Layer	Range (%)	Average (%)	Standard deviation (%)
Clay loam	29,778	Layer 1	22.5 ~ 33.0	27.2	2.7
		Layer 2	22.0 ~ 35.6	27.2	3.9
		Layer 3	22.1 ~ 35.4	25.1	4.2
		Layer 4	33.9 ~ 36.3	34.6	0.6
Sandy loam	12,197	Layer 1	8.1 ~ 14.9	10.4	1.6
		Layer 2	8.2 ~ 17.6	12.5	2.6
		Layer 3	8.0 ~ 17.9	10.8	3.3
		Layer 4	15.6 ~ 18.7	16.7	0.7
Silty clay loam	2,598	Layer 1	23.4 ~ 34.9	29.1	2.7
		Layer 2	22.1 ~ 37.5	28.4	4.5
		Layer 3	22.1 ~ 36.1	24.5	3.8
		Layer 4	35.9 ~ 38.1	36.5	0.4
Clay	2,119	Layer 1	30.4 ~ 38.4	33.3	2.1
		Layer 2	30.2 ~ 41.0	34.4	2.8
		Layer 3	30.0 ~ 40.9	32.0	3.0
		Layer 4	39.9 ~ 42.0	40.5	0.5
Sand	1,710	Layer 1	5.0 ~ 7.3	5.5	0.4
		Layer 2	5.0 ~ 9.6	6.9	1.2
		Layer 3	5.0 ~ 10.0	6.8	1.6
		Layer 4	8.0 ~ 10.6	9.2	0.8

Table 4.8 Variation of estimated soil moisture contents for sesame ('16. 9.15.)

Soil texture	Number of grids	Layer	Range (%)	Average (%)	Standard deviation (%)
Clay loam	29,778	Layer 1	24.5 ~ 35.6	32.4	2.2
		Layer 2	22.8 ~ 36.4	32.3	3.9
		Layer 3	22.5 ~ 37.2	28.6	5.3
		Layer 4	34.6 ~ 37.8	35.4	0.5
Sandy loam	12,197	Layer 1	9.0 ~ 17.5	14.4	2.1
		Layer 2	8.7 ~ 18.5	15.8	2.3
		Layer 3	8.1 ~ 19.1	13.4	4.1
		Layer 4	16.7 ~ 19.9	17.6	0.7
Silty clay loam	2,598	Layer 1	26.5 ~ 37.6	34.7	2.0
		Layer 2	22.8 ~ 38.4	33.4	4.6
		Layer 3	23.1 ~ 38.9	28.0	5.3
		Layer 4	36.7 ~ 39.4	37.3	0.5
Clay	2,119	Layer 1	32.2 ~ 41.3	38.0	2.1
		Layer 2	30.8 ~ 42.1	38.0	3.2
		Layer 3	30.2 ~ 42.5	34.5	4.5
		Layer 4	40.6 ~ 43.1	41.3	0.5
Sand	1,710	Layer 1	5.1 ~ 9.6	7.6	1.1
		Layer 2	5.7 ~ 10.4	9.0	1.1
		Layer 3	5.0 ~ 11.1	8.6	1.7
		Layer 4	8.7 ~ 11.9	9.9	0.7

4.3 고해상도 기상자료 적용 관개용수량 산정 결과

토양수분 모의를 기반으로 관개모의를 수행한 결과 고추 ('16. 5.24 ~ 10.20.), 콩 ('16. 5.24. ~ 9.20.), 참깨 ('16. 5.24. ~ 9.20.)에 대하여 총 순관개량을 구하였고, 이를 토성에 따라 분류하였으며, 그 결과는 Fig. 4.10 ~ 4.15, Table 4.9 ~ 4.11와 같이 나타났다.

세 작물 중 고추는 전체 순관개량이 평균 471.7 mm로 가장 크게 나타났다. 콩의 경우 평균 273.2 mm이며, 참깨는 평균 173.8 mm으로 전체 모의기간의 차이를 고려하더라도 고추에서의 관개요구량이 가장 큰 것으로 나타났다.

토양수분과 마찬가지로 관개용수량에도 지역적 편차가 나타났는데, 세 작물 모두 여주, 이천 동남부, 음성 북부 지역에서의 순관개량은 타 지역에 비해 상대적으로 작게 모의되었으며, 이천 북서부와 모의지역의 남서부 및 남동부는 상대적으로 크게 모의되었다. 이천지역의 경우 동남부와 서북부의 모의결과가 차이를 보였으며, 인접한 격자 간에도 순관개량 모의량이 크게 차이나는 사례도 나타났다.

토성에 따라 분류해 보면 고추의 경우 식양토의 경우 평균 470.6 mm, 사양토에서 평균 487.7 mm, 미사질식양토에서 평균 462.1 mm, 식토에서 평균 485.2 mm, 사토에서 평균 469.5 mm로 계산되었다. 콩의 경우 식양토에서 평균 269.0 mm, 사양토에서 283.5 mm, 미사질식양토에서 평균 258.7 mm, 식토에서 평균 285.2 mm, 사토에서 평균 280.1 mm로 나타났다. 참깨의 경우 식양토에서 평균 170.9 mm, 사양토에서 평균 180.2 mm, 미사질식양토에서 평균 165.5 mm, 식토에서 평균 175.2 mm, 사토에서 평균 188.3 mm로 산정되었다. 동일한 작물과 토성 내에서도 순관개량이 다르게 산정된 것은 고해상도 기상자료를 적용함에 따라 격자별 기상차이가 반영된 결과이다.

토성 간 평균 순관개량은 미사질식양토가 세 작물 모두 가장 적은 값으로 산정되었다. 그러나 대상지역의 토성 분포가 균일한 것이 아니므로 토성별로 적용되는 기상 분포가 다를 수 있음을 고려해야 한다.

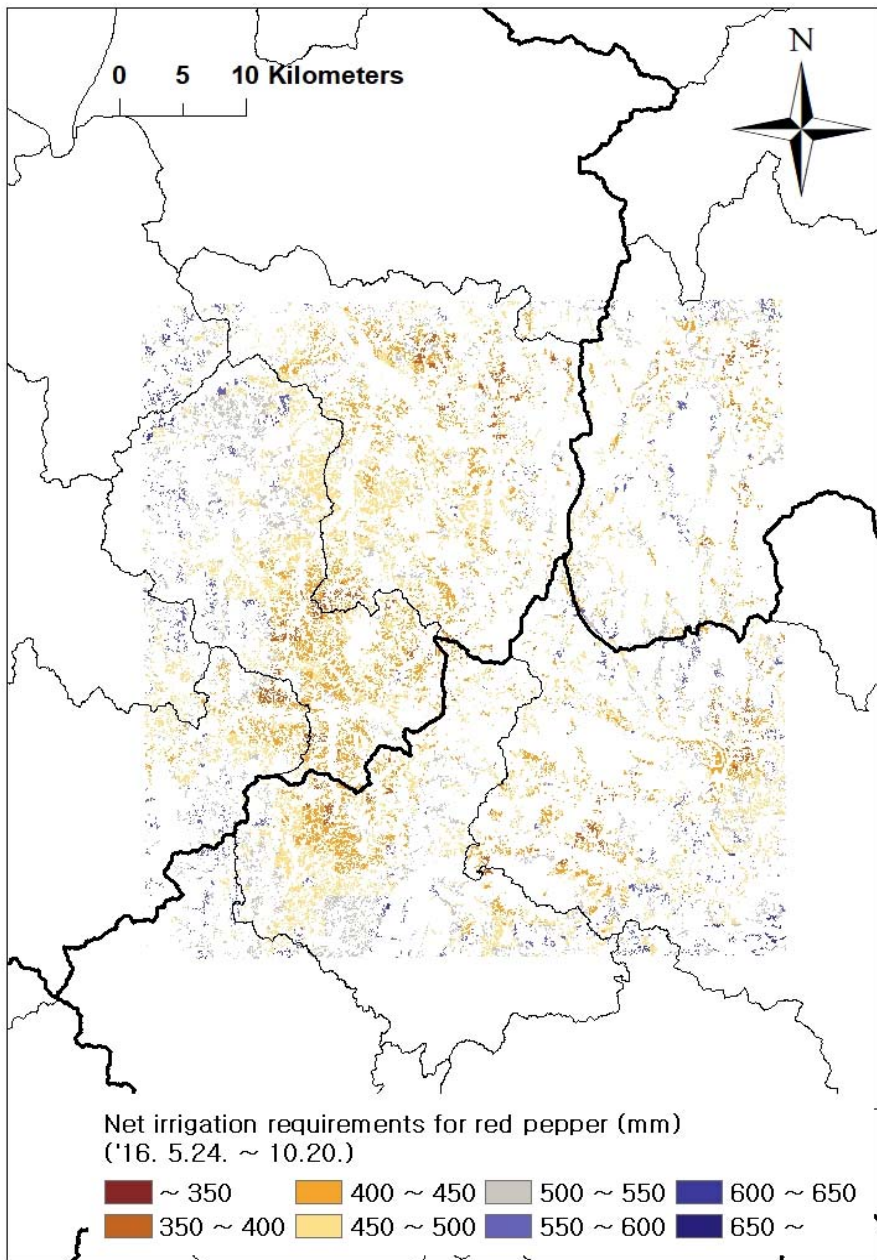


Fig. 4.10 Spatial variation of net irrigation requirements for red pepper according to spatially different weather conditions.

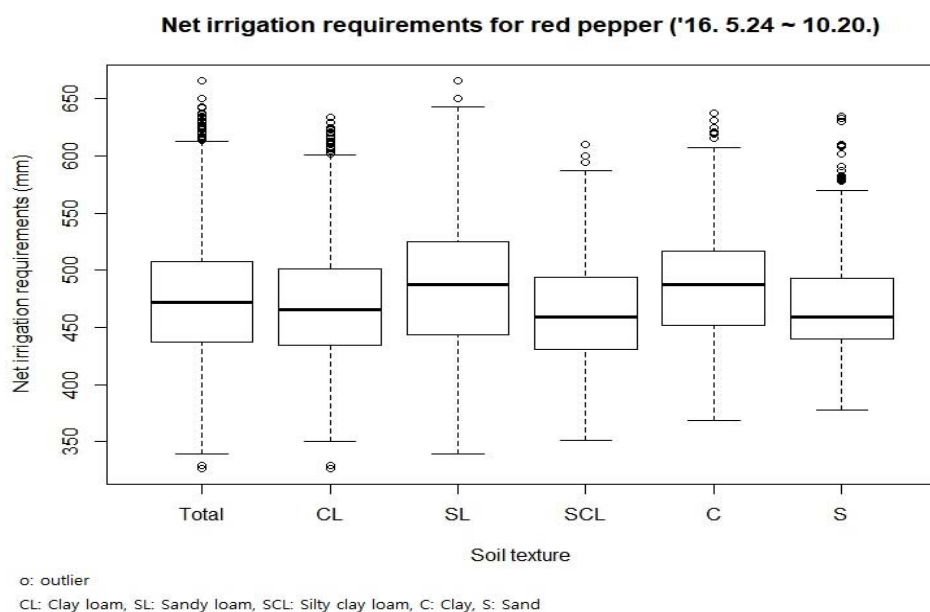


Fig. 4.11 Variation of net irrigation requirements for red pepper about soil texture of the study area.

Table 4.9 Variation of net irrigation requirements for red pepper about soil texture

Soil texture	Number of grids	Range (mm)	Average (mm)	Standard deviation (mm)
Total	48,402	326.6 ~ 665.8	471.7	50.7
Clay loam	29,778	326.6 ~ 634.2	470.6	48.5
Sandy loam	12,197	338.8 ~ 665.8	487.7	55.7
Silty clay loam	2,598	350.8 ~ 610.2	462.1	46.5
Clay	2,119	368.4 ~ 637.6	485.2	44.7
Sand	1,710	378.0 ~ 635.1	469.5	45.3

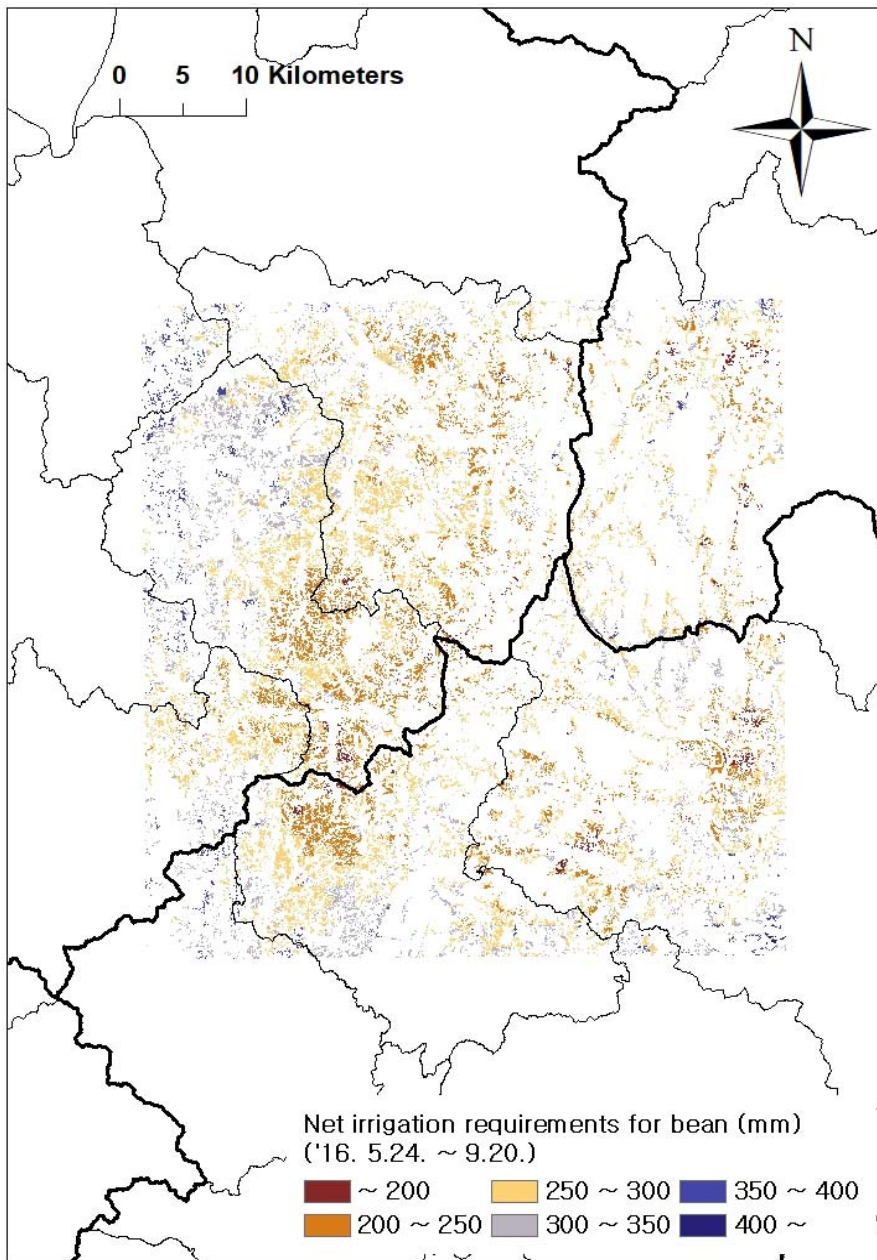


Fig. 4.12 Spatial variation of net irrigation requirements for bean according to spatially different weather conditions.

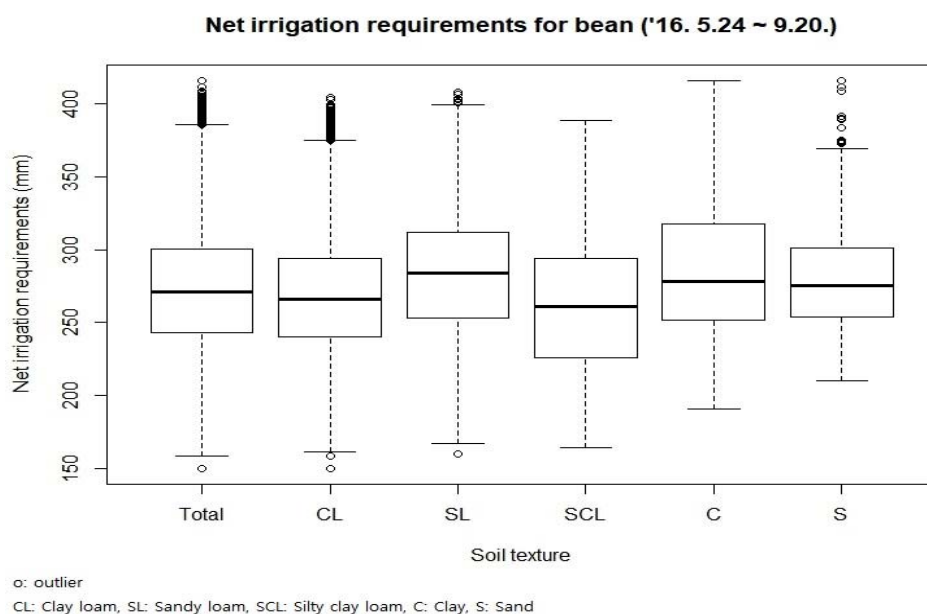


Fig. 4.13 Variation of net irrigation requirements for bean about soil texture of the study area.

Table 4.10 Variation of net irrigation requirements for bean about soil texture

Soil texture	Number of grids	Range (mm)	Average (mm)	Standard deviation (mm)
Total	48,402	149.9 ~ 415.8	273.2	41.7
Clay loam	29,778	149.9 ~ 404.1	269.0	40.4
Sandy loam	12,197	159.5 ~ 408.0	283.5	42.6
Silty clay loam	2,598	164.3 ~ 388.5	258.7	41.8
Clay	2,119	190.9 ~ 415.8	285.2	41.4
Sand	1,710	209.8 ~ 415.8	280.1	36.6

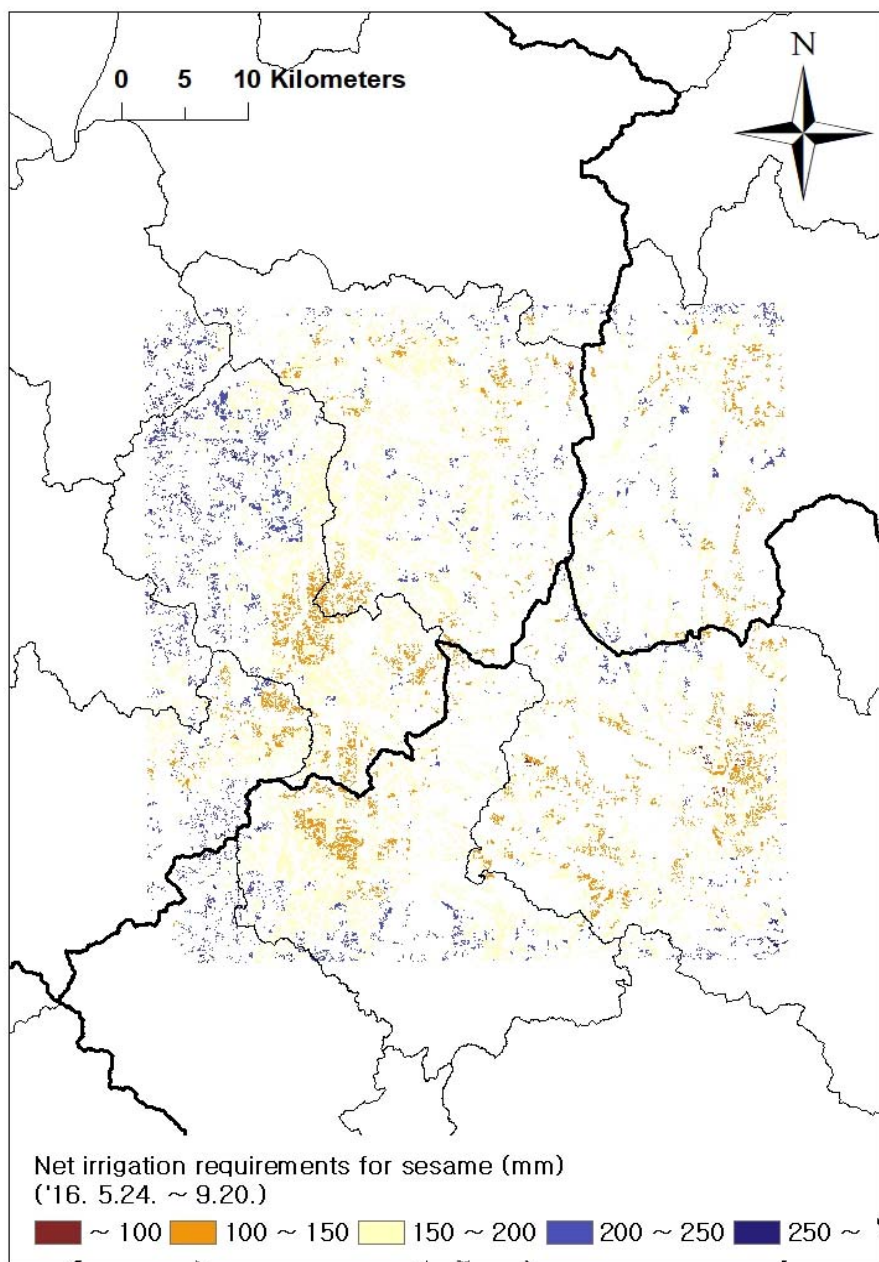


Fig. 4.14 Spatial variation of net irrigation requirements for sesame according to spatially different weather conditions.

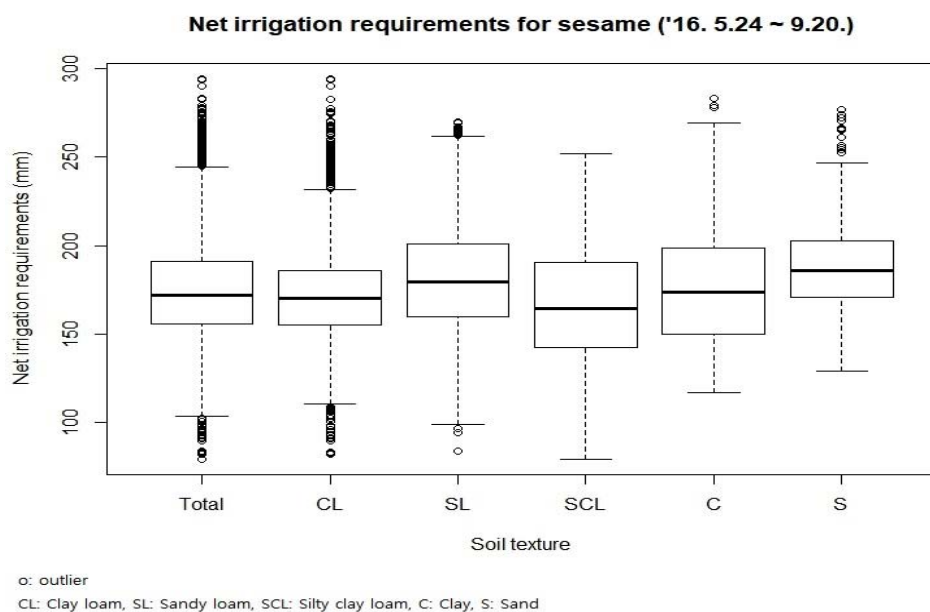


Fig. 4.15 Variation of net irrigation requirements for sesame about soil texture of the study area.

Table 4.11 Variation of net irrigation requirements for sesame about soil texture

Soil texture	Number of grids	Range (mm)	Average (mm)	Standard deviation (mm)
Total	48,402	79.1 ~ 294.3	173.8	29.8
Clay loam	29,778	81.8 ~ 294.3	170.9	28.2
Sandy loam	12,197	83.8 ~ 270.2	180.2	32.4
Silty clay loam	2,598	79.1 ~ 252.2	165.5	30.1
Clay	2,119	116.5 ~ 283.1	175.2	26.7
Sand	1,710	128.8 ~ 276.8	188.3	26.1

제 5 장 요약 및 결론

본 연구에서는 물수지 방정식을 기반으로 토양수분 모의를 수행함에 있어 지연보정계수를 도입하여 기존 모의방식을 개선하고자 하였으며, 이를 토양수분 실측자료를 기준으로 기존 모형과 비교 검증하였다. 검증된 토양수분 모의 방식을 바탕으로 고해상도 기상자료와 함께 고추, 콩, 참깨의 생육기간에 대하여 토양수분 모의 및 관개용수량 산정을 수행하였다.

본 연구에서 제안한 물수지 방정식 기반 토양수분 모의 방식은 토층 간 수분 이동시 지연보정계수를 도입하는 것으로, 이를 통해 포장용수량을 초과하는 토양수분량의 배수에 요구되는 시간적 편차를 반영하였고, 포장용수량을 토양수분 모의의 상한계로 설정하여 발생 가능한 양적 오류를 개선하였다.

개선된 토양수분 모의의 성능을 검증하기 위하여 2016년 6월 4일부터 10월 20일까지 경기도 여주시에 위치한 고추밭에서 측정한 실측치와 본 모형을 이용한 모의 결과 및 기존 토층별 토양수분 모형에 따른 모의 결과를 비교하였다. 실측치에서는 토양수분이 포장용수량 이상으로 상승하고, 토층 깊이에 따라 강우에 대한 토양수분 반응의 시간차가 나타날 수 있음이 관측되었다. 이러한 현상은 기존 모의방식에서 가정한 포장용수량 이상의 토양수분이 즉시 배수됨이 옳지 않음을 의미하며, 본 연구에서 제시한 토양수분 모의 방식을 사용할 때 실측 토양수분을 정성적으로 더 잘 반영할 수 있음을 확인하였다. 또한 토양수분 실측치와 지연보정계수를 고려한 토양수분 모의 결과를 정량적으로 비교한 결과 R^2 는 각 토층 1, 2, 3, 4에 대하여 0.58, 0.54, 0.67, 0.48, RMSE는 각각 3.88 %, 2.84 %, 2.53 %, 1.61 %로 산정되었으며, 이는 토층 4의 RMSE를 제외하면 기존 모형보다 향상된 결과였다. 따라서 본 지연보정계수를 도입한 토양수분 모의 방식은 실측치와의 검증과 기존 모의방식과의 모의 성능 비교 결과 합당한 것으로 판단하였다. 특히 토양수분 모의를 기반으로 관개량을 산정할 경우에는 기존 모의방식에 따른 경우 결과가 상대적으로 크게

나타나는 오차가 있음도 확인하였다.

LAMP에서 추출한 고해상도 기상자료를 적용한 토양수분 모의는 고추의 경우 2016년 5월 24일부터 10월 20일까지, 콩과 참깨의 경우 2016년 5월 24일부터 9월 20일까지 4개 토층, 5종류의 토성에 대하여 수행되었다. 모의 결과 고해상도 기상자료를 적용할 경우 지역적 기상 편차를 반영하여 토양수분 모의를 수행 할 수 있으며, 관개 계획도 달라질 수 있는 것으로 나타났다.

토양수분 모의 결과를 바탕으로 작물별, 토성별 순관개량을 산정하였으며, 고추, 콩, 참깨에서 각각 평균 471.7 mm, 273.2 mm, 173.8 mm의 순관개량이 필요한 것으로 나타났다. 순관개량의 경우에도 동일 작물, 동일 토성에 대해서도 공간적 변동을 보였으며, 이는 고해상도 기상자료를 적용함에 따라 격자별 기상차이가 반영된 결과로 판단된다.

본 연구에서는 기존 토양수분 모의를 포장용수량 이상의 토양수분량이 모의 가능하도록 개선하고, 토양수분의 상승 및 하강 경향성을 개선하였으나, 토양수분의 양을 정확히 모사하는 것에는 한계가 있었다. 지연보정 계수는 토성, 토양수분 함량 등에 따라 달라질 것이나, 본 연구에서는 단일한 값으로 가정하고 시행착오법으로 구하였으므로, 일반적인 값을 제시하기 위해서는 추가적인 연구사례가 필요할 것으로 보인다. 토양수분 소비형을 반영하기 위해 적용한 토층의 개수나 두께는 연구자의 판단에 따라 결정되어야 하며, 작물에 따라 근근역이 달라지므로 토층 구성도 달라질 수 있다. 또한 작물의 뿌리성장에 따라 수분 흡수 양상이 달라지므로, 고정된 토층을 가정할 경우 토층별 토양수분 소비형이 시간에 따라 달라져야 한다. 다만 이는 물수지 방정식을 기반으로 한 토양수분 모의에서는 유효토층 내 수분의 재분배가 고려되지 않는 근본적인 한계가 있어 고려하지 않는 것으로 하였다.

본 연구는 개선된 물수지 기반 토양수분 모의 방식을 제시함으로써 향후 토양수분을 기반으로 하는 관개계획, 농업적 가뭄 판단 등의 연구에 적용될 수 있을 것이다. 또한 본 연구는 고해상도 기상자료를 적용함으로

씨 토양수분 변화 모의 및 관개량 산정에 있어 지역적 기상 편차를 반영할 수 있음을 보였다는 것에 의의가 있다.

References

1. 김대준, 윤진일, 2013. 기상청 동네예보의 영농활용도 증진을 위한 방안: 2. 강수량 분포 상세화. 한국농림기상학회지 15(3): 171-177.
2. 김맹기, 이대희, 김진옥, 2013. 남한 1km 해상도의 격자형 일 기상자료 생산과 검증. 기후연구 8(1) 13-25.
3. 김수옥, 김대준, 김진희, 윤진일, 2013. 기상청 동네예보의 영농활용도 증진을 위한 방안: 1. 기온역전조건의 국지기온 보정. 한국농림기상학회지 15(2): 76-84.
4. 김수옥, 윤진일, 2014. 기상청 동네예보의 영농활용도 증진을 위한 방안: 3. 사면 일 최고기온 결정에 미치는 이류효과 보정. 한국농림기상학회지 16(4): 297-303.
5. 김수옥, 윤진일, 2015. 기상청 동네예보의 영농활용도 증진을 위한 방안: 4. '하늘상태'를 이용한 일조시간 및 일 적산 일사량 상세화. 한국농림기상학회지 17(4): 281-289.
6. 김수옥, 윤진일, 2016. 기상청 동네예보의 영농활용도 증진을 위한 방안: 5. 하늘상태 기반 기온감률 추정기법의 실용성 평가. 한국농림기상학회지 18(3): 135-142.
7. 김옥경, 최진용, 장민원, 유승환, 남원호, 이주현, 노재경, 2006. 토양수분지수를 이용한 유역단위 가뭄 평가. 한국농공학회논문집 48(6): 3-13.
8. 김철희, 고재균, 1977 a. 토양수분함량 예측 및 계획관개 모의 모형 개발에 관한 연구 I. 한국농공학회지 19(1): 4279-4295.
9. 김철희, 고재균, 1977 b. 토양수분함량 예측 및 계획관개 모의 모형 개발에 관한 연구 II. 한국농공학회지 19(1): 4367-4376.
10. 남원호, 홍은미, 장민원, 최진용, 2014. 토양수분모형을 이용한 미래 주요 발작물 소비수량 및 관개용수량 전망. 한국농공학회논문집 56(5): 77-87.

11. 노희명, 1988. 밭토양(중동통)의 토양수분이동 및 분포에 관한 모형 연구. 서울대학교 박사학위논문.
12. 배승중, 1998. 토양수분물수지모형과 지리정보시스템을 이용한 가뭄 분석에 관한 연구. 서울대학교 석사학위논문.
13. 백종진, 정용, 최민하, 2012. 중소규모 (WRF-ARW) 기후모형을 이용한 지역유출 모의 평가; 청미천 지역을 중심으로. 대한토목학회 논문집 32(1): 29-39.
14. 서명철, 허승오, 손연규, 조현숙, 전원태, 김민경, 김민태, 2012. 일별 기상자료를 이용한 농경지 물 수지 및 토양수분 예측모형 (AFKAE0.5) 개발. 한국토양비료학회지 45(6): 1203-1210.
15. 서영제, 이광야, 2002. 발용수량 산정방법. 한국농공학회지 44(1): 25-34.
16. 송지애, 이승재, 강민석, 문민규, 이정훈, 김준, 2015. 2014년 특별 관측 기간 동안 청미천 농경지에서의 WRF/Noah-MP 고해상도 수치모의. 한국농림기상학회지 17(4): 384-398.
17. 신용훈, 최진용, 이승재, 이성학, 2017. 고해상도 기상자료와 토양수분모형을 이용한 고추의 관개량 산정. 한국농공학회논문집 59(5): 31-40.
18. 유능환, 민병섭, 1974. 밭에의 토양수분 소비기구에 관한 연구. 한국농공학회지 16(4): 11-27.
19. 이광야, 김선주, 2001. 농업용수 수요량 산정 시스템 개발. 한국농공학회지 43(1): 53-65.
20. 이승재, 강지순, 유혜림, 2012. 대기모델링, 자료동화, 그리고 예측가능성. (주)시그마프레스. 384쪽.
21. 이승재, 김준, 강민석, 빈드 말러 타쿠리, 2014. 광릉 KoFlux 관측지 계곡에서의 국지 대기순환 수치모의. 한국농림기상학회지 16(3): 244-258.

22. 이승재, 송지애, 김유정, 2016. 국가농림기상센터 지면대기모델링 패키지 (NCAM-LAMP) 버전 1: 구축 및 평가. 한국농림기상학회지 18(4): 307-319.
23. 이하늘, 2017. 1980년대 한국 날씨예보기술의 개발: 전산화 시스템의 도입과 예보 실행에서의 객관성 추구. 서울대학교 석사학위논문.
24. 정하우, 1990. 밭작물 소비수량 산정방법정립 연구 (IV). 농림수산부 농어촌진흥공사.
25. 정하우, 2005. 한국의 작물 소비수량 산정. 서울대학교 농업생명과학대학 지역시스템공학과 관개배수공학연구실.
26. 정하우, 김선주, 김진수, 노재경, 박기욱, 손재권, 윤광식, 이근후, 이남호, 정상옥, 최중대, 최진용, 2013. 관개배수공학 제2판. 동명사.
27. 최진용, 1991. 토양수분이동모형을 이용한 관개계획, 서울대학교 석사학위논문.
28. 최진용, 1996. 지리정보시스템을 이용한 장기유출모형의 개발에 관한 연구. 서울대학교 박사학위논문.
29. 홍기욱, 서명석, 나득균, 장동호, 김찬수, 김맹기, 2007. GIS와 PRISM을 이용한 고해상도 격자형 기온자료 추정. 대기 17(3): 255-268.
30. 홍민기, 이상현, 최진용, 이성학, 이승재, 2015. WRF 기상자료의 토양수분 모형 적용을 통한 밭 토양수분 및 필요수량 산정. 한국농공학회논문집 57(6): 173-183.
31. 홍은미, 최진용, 유승환, 남원호, 2012. 잣나무림에서의 시기별 토층별 토양수분 특성분석. 한국농공학회논문집 54(4): 105-114.
32. 홍은미, 남원호, 최진용, 2015. 토양수분모형을 이용한 주요 밭작물의 미래 가뭄 전망 -전라남도 지역을 중심으로-. 한국농공학회논문집 57(3): 65-76.

33. Abatzoglou J. T., 2013. Development of gridded surface meteorological data for ecological applications and modeling. *International Journal of Climatology* 33(1): 121–131.
34. Allen, R. G., L. S. Pereira, D. Raes, and M. Smith, 2006. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. FAO irrigation and drainage paper No. 56. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
35. Alley, W. M., 1984. On the treatment of evapotranspiration, soil moisture accounting, and aquifer recharge in monthly water balance model. *Water Resource Research* 20(8): 1137–1149.
36. Aubert, D., C. Loumagne, and L. Oudin, 2003. Sequential assimilation of soil moisture and streamflow data in a conceptual rainfall–runoff model. *Journal of Hydrology* 280(1–4): 145–161.
37. Belmans, C., J. G. Wesseling, and R. A. Feddes, 1983. Simulation model of the water balance of a cropped soil: SWATRE. *Journal of Hydrology* 63(3–4): 271–286.
38. Briggs, L. J., 1897. The mechanics of soil moisture. USDA Bureau of Soils Bull. 10.
39. Buckingham, E., 1907. Studies on the movement of soil moisture. USDA Bureau of Soils No. 38.
40. Charney, J., F. R. Fjortoft, and J. V. Neumann, 1950. Numerical integration of the barotropic vorticity equation. *Tellus* 2(4): 237.

41. Cowan, I. R., 1965. Transport of water in the soil-plant-atmosphere system. *Journal of Applied Ecology* 2(1): 221-239.
42. David, B., 1980. The computation of equivalent potential temperature. *American meteorological society* 108: 1046-1053.
43. Gardner, W. R., 1919. The movement of soil moisture in soil by capillarity. *Soil Science* 7: 313-317.
44. Greve, P., K. W. Sagi, and V. Wulfmeyer, 2013. Evaluating soil water content in a WRF-Noah downscaling experiment. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 52: 2312-2327.
45. Hanks, R. J., and S. A. Bowers, 1962. Numerical solution of the moisture flow equation for infiltration into layered soils. *Soil Science* 26: 530-534.
46. Huang, J., H. Dool, and K. P. Georganakos, 1995. Analysis of model-calculated soil moisture over the United States (1931 - 1993) and application to long-range temperature forecasts. *Journal of Climate* 9: 1350-13620.
47. Jensen, M. E., J. L. Wright, and B. J. Pratt, 1971. Estimating soil moisture depletion from climate, crop and soil data. *Transactions of the ASAE* 14.
48. Klute, A., 1952. A numerical method for solving the flow equation for water in unsaturated materials. *Soil Science* 73: 105-116.
49. Ledieu, J., P. D. Ridder, P. D. clerck, and S. Dautrebande, 1986. A method of measuring soil moisture by time-domain reflectometry. *Journal of Hydrology* 88: 319-328.

50. Molz, F. J., 1971. Interaction of water uptake and root distribution. *Agronomy Journal* 63: 608–610.
51. Molz, F. J., and I. Remson, 1971. Application of an extraction-term model to the study of moisture flow to plant roots. *Agronomy Journal* 63: 72–77.
52. Nam, W. H., J. Y. Choi, S. H. Yoo, and B. A. Engel, 2011. A real-time online drought broadcast system for monitoring soil moisture index. *Journal of Civil Engineering* 16(3): 357–365.
53. Nimah, M. N., and R. J. Hanks, 1973 a. Modeling for estimating soil water, plant, and atmospheric interrelations; I. Description and sensitivity. *Soil Science* 37: 522–527.
54. Niu, G. Y., Z. L. Yang, K. E. Mitchell, F. Chen, M. B. Ek, M. Barlage, A. Kumar, K. Manning, D. Niyogi, E. Rosero, M. Tewari, and Y. Xia, 2011. The community Noah land surface model with multiparameterization options (Noah-MP): 1. Model description and evaluation with local-scale measurements. *Journal of Geophysical Research* 116(D12): 109.
55. Philip, J. R., 1966. Plant water relations; Some physical aspects. *Annual Review of Plant Physiology* 17: 245–268.
56. Richards, L. A., 1931. Capillary conduction of liquids in porous mediums. *Physics*. 1: 318–333.
57. Saxton, K. E., and W. J. Rawls, 2006. Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrological solutions. *Oil Science Society of America Journal* 70(5): 1569–1578.

58. Shaxson, F., and R. Barber, 2003. Optimizing soil moisture for plant production: The significance of soil porosity. FAO soils bulletin 79. Rome, Italy: UN-FAO.
59. U.S. Soil Conservation Service, 1973. A method for estimating volume and rate of runoff in small watersheds. Technical paper No. 149. Washington D. C.: USDA-SCS.
60. Vorosmarty, C. J., C. A. Federer, and A. L. Schloss, 1998. Potential evaporation functions compared on US watersheds; Possible implications for global-scale water balance and terrestrial ecosystem modeling. *Journal of Hydrology* 207: 147-169.
61. Yamaguchi, Y., and M. Shinoda, 2002. Soil moisture modeling based on multiyear observations in the sahel. *Journal of applied meteorology* 41: 1140-1146.

Abstract

Soil Moisture Simulation Considering Saturated Water Flow and Irrigation Requirement Estimation in Upland Fields

Shin, Yong-hoon

Major in Rural Systems Engineering

Department of Landscape Architecture and Rural Systems Engineering

Seoul National University

The aim of this study is to improve soil moisture simulation based on water balance equation and to estimate net irrigation requirements for using high-resolution weather data. Quantitative and temporal errors in the soil moisture simulation occurred as the existing simulation model based on water balance which restricts maximum soil moisture to field capacity and supposes surplus soil moisture drains immediately. In this study, modified soil moisture simulation which restricts upper limits of soil moisture applying saturated water concept and controls daily maximum drainage among the surplus water applying lag coefficient. Soil moisture was monitored using FDR (Frequency Domain Reflectometry) sensors and the data were used to validate the simulation model in red pepper field from June 4 to October 20 in 2016. The LAMP (Land-Atmosphere Modeling Package) high-resolution meteorological data provided from National Center for AgroMeteorology (NCAM) was used to

simulate soil moisture and to estimate net irrigation requirements as the input weather data.

The results showed that the modified model simulated the observed soil moisture variation better than the existing model. R^2 between the simulated data and the observed data by soil depth was 0.58, 0.54, 0.67, and 0.48, respectively and RMSE was 3.88 %, 2.84 %, 2.53 %, and 1.61 %, respectively. The soil moisture simulation using LAMP showed spatially detailed pattern under different weather conditions and soil texture. Net irrigation requirements were also different by location reflecting the spatially distributed weather condition. The average of the net irrigation requirements and standard deviation were 471.7 mm and 50.7 mm for red pepper from May 24 to October 20 in 2016. They were 273.2 mm and 41.7 mm for bean from May 24 to September 20 in 2016 and 173.8 mm and 29.8 mm for sesame from May 24 to September 20 in 2016.

The improved soil moisture simulation could be applied other studies such as irrigation scheduling and agricultural drought which based on soil moisture as well as simulation itself. And this study was demonstrated that high resolution meteorological data could provide an opportunity of spatially different crop water requirement estimation during the irrigation management.

Keywords : Soil moisture contents; Water balance equation;
Saturated water; Irrigation requirements;
High resolution meteorological data

Student number : 2016–21706